Versuche

mit

einer elektrischen Pfeife

(Mit 14 Abbildungen)

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen philosophischen Fakultät

der

Universität Rostock

AGAD.
LIBRARY
KIEL

vorgelegt

von

H. Pflaum
aus Riga

Braunschweig
Druck von Friedrich Vieweg und Sohn
1909

Referent: Professor Dr. **Ad. Heydweiller.**

Inhaltsverzeichnis.

		Seite
§ 1.	Historisches	1
§ 2.	Beschreibung der elektrischen Pfeife	2
§ 3.	Dimensionen der Heizgitter	8
§ 4.	Dimensionen der Klangröhren	10
§ 5.	Stellung der Klangröhren	10
§ 6.	Lage des Heizrostes	11
§ 7.	Röhrensubstanz	16
§ 8.	Lage der Knoten und Bäuche	17
§ 9.	Abstand zwischen Heizrost und Schwingungsknoten	22
§ 10.	Schwingungszahlen des Grundtones	23
§ 11.	Obertöne der elektrischen Pfeife	27
§ 12.	Durch Kühlgitter erzeugte Töne	28
§ 13.	Klangfarbe der elektrischen Pfeife	31
§ 14.	Dauer der Tonentwickelung	32
§ 15.	Dauer des Tönens	33
§ 16.	Tonbegünstigende und tonverhindernde Umstände	34
§ 17.	Luftbewegung in der elektrischen Pfeife	41
§ 18.	Zusammenfassung der Bedingungen für das Tönen	47
§ 19.	Reibungstöne	48
§ 20.	Verschiedene Versuche eine offene Röhre zum Tönen zu bringen	50
§ 21.	Versuch einer Erklärung der Tonbildung	55
Benutzte Literatur		57

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41551526_0112

Versuche mit einer elektrischen Pfeife.

§ 1. Historisches.

Im Jahre 1859 veröffentlichte Rijke[1]) seine Versuche, bei welchen er eine beiderseits offene Röhre dadurch zum Tönen brachte, daß er innerhalb derselben eine Scheibe von Metallgeflecht bis zum Glühen erhitzte. Jene Versuche sind, wie es scheint, keiner besonderen Aufmerksamkeit gewürdigt worden; in den meisten Lehrbüchern der Physik sind sie nicht einmal erwähnt, wie z. B. im Lehrbuche von Müller-Pouillet (zehnte Aufl. von Pfaundler), von Wüllner, im Handbuch der Physik von Winkelmann (Akustik von Melde). Auch scheint es, daß nur wenige Untersuchungen jener Entstehungsart von Tönen gewidmet sind, wenigstens gelang es mir bei Durchsicht der „Annalen der Physik" [zur Verfügung standen die Bände seit 1790[2])], der „Beiblätter zu den Annalen" und der „Fortschritte der Physik" nur sechs Arbeiten zu finden, welche sich zum Teil mit derselben beschäftigen.

Was insbesondere den Versuch von Rijke anlangt, Röhren durch elektrisch erhitzte Drähte zum dauernden Tönen zu bringen, so habe ich bis jetzt keine einzige Arbeit gefunden, welche sich mit demselben beschäftigt. Mir selbst aber war auch jener Rijkesche Versuch unbekannt, als ich es im Jahre 1901 unternahm, mir einen Apparat zur Tonerzeugung mittels eines elektrisch geheizten Drahtrostes anzufertigen, wobei ich hinsichtlich des Erfolges noch im Zweifel war. Obgleich nun bald darauf eine Durchsicht des Strobelschen Sachregisters der „Annalen" mir zeigte, daß der Grundversuch selbst nicht mehr neu sei, so war doch das Interesse an der ganzen Erscheinung einmal geweckt und hat mich dazu veranlaßt, dieselbe eingehender zu verfolgen.

Rijke hat seine Versuche wahrscheinlich in der Absicht angestellt, einen direkten Beweis dagegen zu erbringen, daß das Tönen der sogenannten „chemischen Harmonika" durch rhythmische Explosionen von Knallgas hervorgerufen werde, wie man zu jener Zeit, namentlich in

[1]) P. L. Rijke, Notiz über eine neue Art, die in einer an beiden Enden offenen Röhre enthaltene Luft in Schwingungen zu versetzen. Pogg. Ann. **107**, 339 bis 343, 1859.

[2]) Von 1790 bis 1794 unter dem Titel: Journ. d. Phys., von 1795 bis 1797: Neues Journ. d. Phys. v. Gren.

Anlehnung an Faraday, vielfach glaubte. Um das Auftreten eines Tones bei völliger Abwesenheit von Wasserdampf nachzuweisen, benutzte er unter anderem zur Erhitzung des Metallgeflechts eine Flamme von sorgfältig getrocknetem Kohlenoxyd.

Über die Dimensionen der über das erhitzte Geflecht gestülpten Klangröhren macht Rijke die Angaben, daß er zuerst ein 80 cm langes, am oberen Ende 37 mm, am unteren 33 mm weites Glasrohr benutzt und sich auch davon überzeugt habe, daß Röhren von anderen Dimensionen brauchbar sind, daß es jedoch nicht gelingt, einen Ton zu erhalten, falls die Rohrlänge weniger als 20 cm beträgt. Das benutzte Metallgeflecht hatte 81 Maschen auf 1 qcm Fläche und bestand aus 0,2 mm dickem Eisendraht, so daß die Weite der einzelnen Maschenlücken ungefähr gleich 0,9 mm war. Wie wir im folgenden sehen werden, sind die Angaben über die Dimensionen der Klangröhren und die Beschaffenheit der Metallgeflechte keineswegs belanglos. — Wurden mehrere Drahtscheiben übereinandergelegt, so hatte dies eine Zunahme der Dauer des Tones zur Folge. Damit das Tönen mit möglichster Stärke auftrete, war es nötig, die Drahtscheibe in eine Entfernung vom unteren Rohrende zu bringen, die einem Viertel der ganzen Rohrlänge gleich war.

Bosscha, welcher mit Rijke gemeinschaftlich experimentierte, machte die weitere Beobachtung, daß zuweilen in dem Augenblicke, wo man die Drahtscheibe zu erhitzen beginnt, ein Ton und zwar der erste Oberton entsteht. Auf diese Beobachtung und insbesondere die Angabe über die Tonhöhe, soll weiter unten näher eingegangen werden.

Der erste, welcher den Rijkeschen Versuch wiederholt hat, scheint Riess[1]) gewesen zu sein. Seine erste Veröffentlichung hierüber datiert vom 2. November 1859, während Rijkes Arbeit am 27. April 1859 niedergeschrieben worden ist und wohl erst im Juni desselben Jahres im Drucke erschienen sein dürfte. Riess richtete sein Augenmerk vornehmlich auf die von Bosscha beobachtete Erscheinung. Er näherte einem in eine Glasröhre gesteckten feinmaschigen Drahtnetze eine Leuchtgas- bisweilen auch eine Kerzenflamme von unten her und fand hierbei, daß man, falls sich das Drahtnetz oberhalb der Rohrmitte befindet, statt der von Bosscha beobachteten Oktave den Grundton der Röhre erhalte. Die Dauer des auf diese Weise erhaltenen Tones betrug 12 bis 70 Sekunden, seine Intensität war recht bedeutend, und wurde daher die Flamme durch die lebhafte Luftbewegung nicht selten ausgelöscht. Riess teilt die Dimensionen von vier zu seinen Versuchen benutzten Röhren mit, woraus sich finden läßt, daß das Verhältnis ihres Durchmessers zur Länge stets kleiner war als $^1/_7$ und im Maximum den Wert 0,12 hatte. Auch die Lage des Drahtnetzes ist mitgeteilt. Bezeichnen

[1]) P. Riess, Das Anblasen offener Röhren durch eine Flamme. Pogg. Ann. **108**, 653 bis 656, 1859.

wir mit l die Rohrlänge, so betrug die Netzhöhe, d. h. der Abstand des Drahtnetzes vom unteren Rohrende in den benutzten Röhren $0{,}73\,l$, $0{,}79\,l$, $0{,}74\,l$ und $0{,}75\,l$.

Eine eingehendere Erklärung für das Zustandekommen des Tönens hat Riess nicht gegeben, wohl aber bemerkt er, daß die wirksamen Impulse die, vom Netze aus gerechnet, längere Luftsäule treffen müßten, und daß sie entweder durch den kalten Luftstrom über dem Drahtnetze oder aber durch den heißen unterhalb des Netzes zustande kommen. Was die Tondauer bei obigen Versuchen anlangt, so hatte sie, wie erwähnt, im Maximum 70 Sekunden betragen. Um anhaltendes Tönen zu erhalten[1]), wurde die Außenwandung einer in diesem Falle aus Kupfer bestehenden Röhre, namentlich an der Stelle, an der sich in ihrem Innern das Drahtnetz befand, durch Wasser gekühlt. Die Netzhöhe war diesmal gleich $0{,}82\,l$. Die Leuchtgasflamme, welche den sich am Netze abzukühlenden heißen Luftstrom erzeugte, hatte etwa 5,4 cm Länge und ihre Spitze stand etwa 4 cm vom Drahtnetze ab. Der entstehende Ton war, wie auch bei den vorherigen Versuchen, nicht ganz rein und erhöhte sich meist um einen halben Ton. Als jedoch eine fast den ganzen Röhrenquerschnitt einnehmende Scheibe aus dünnem Kupferblech dem Netze von oben her bis auf 1 mm Abstand genähert wurde, ließ die Röhre einen sehr reinen Ton erschallen, der ungefähr um einen halben Ton tiefer war, als der ursprünglich erhaltene. Befand sich die Scheibe in inniger Berührung mit dem Netze, so erklang der Ton ebenso rein, nur noch lauter. Riess meint, daß die Kupferscheibe das Zustandekommen der Impulse unterhalb des Netzes durch „Beschränkung des Luftstromes" erleichtert habe.

Da bei seinen Versuchen eine Flamme Anwendung fand, so hält es Riess für angebracht darauf hinzuweisen, daß diese selbst nicht tönend gewesen sei, daß also der „auch sonst nicht zulässige Verdacht, es sei bei dem Versuche der Ton der chemischen Harmonika im Spiele gewesen", durchaus unbegründet sei. Zum Beweise hierfür gibt er an, daß die Röhre verstummte und auch nicht wieder zum Tönen zu bringen war, wenn man die Außenwandung an der Stelle, welche der Netzlage entsprach, abzukühlen aufhörte, während sonst alle übrigen Verhältnisse ungeändert blieben.

Ciamician[2]) erhielt den ersten Oberton, wenn er das Drahtnetz in einem Abstande gleich $^5/_8$ der Rohrlänge, gerechnet vom unteren Rohrende, anbrachte. Ferner fand er, daß ein sehr weitmaschiges Netz, sowie ein spiralförmig eingerollter Draht und ein ebensolcher Blechstreifen keinen Ton erzeugen.

[1]) P. Riess, Anhaltendes Tönen einer Röhre durch eine Flamme. Pogg. Ann. **109**, 145 bis 147, 1860.

[2]) G. Ciamician, Über das Tönen der Luft in Röhren. Wied. Ann. **2**, 133 bis 138, 1879.

Nach Angabe von Ciamician soll die Erzeugung von Tönen durch erhitzte Gitter auch von Hlasiwetz unabhängig von Rijke entdeckt worden sein. Da keine Literaturangabe gemacht ist, war es nicht möglich, zu ermitteln, welcher Art die Versuche von Hlasiwetz waren. Die recht zahlreichen Publikationen dieses Autors beziehen sich der größten Mehrzahl nach auf rein chemische Fragen und wurde daher von einer Durchsicht derselben abgesehen. Auf einen direkt an Dr. Ciamician, Professor der Chemie an der Universität zu Bologna, gerichteten Brief erhielt ich eine liebenswürdige Antwort, in der meine Vermutung, daß Hlasiwetz seine Versuche nicht beschrieben hat, Bestätigung findet; Prof. Ciamician schreibt nämlich u. a.: „Wie ich mich nach so vielen Jahren (der Brief datiert vom 7. März 1908) hieran erinnere, dürfte Hlasiwetz keine Veröffentlichung darüber gemacht haben. Ich habe den Versuch in seinen Vorlesungen gesehen und sagte man mir damals, daß Hlasiwetz unabhängig von anderen die Beobachtung gemacht habe."

Kundt[1]) brachte bei Wiederholung der Rijkeschen Versuche eine Röhre zum dauernden Tönen, indem er in dieselbe eine Drahtschale einführte, welche Platinschnitzel oder Platindraht enthielt. War das Platin vorher erwärmt worden und ließ man von unten her Leuchtgas in die Röhre einströmen, so steigerte sich die Temperatur des Platins derart, daß die Röhre zum dauernden Tönen kam. Die Netze, aus denen die erwähnten Drahtschalen angefertigt waren, bestanden aus Eisendraht und hatten 700 Maschen auf den Quadratzoll. Hieraus ergibt sich eine Maschenfläche von etwa 0,9 mm, doch ist über die Stärke des Eisendrahtes keine Angabe gemacht und kann daher nicht erkannt werden, wie groß die lichte Weite der Maschen, auf die es durchaus ankommt, gewesen war. Wurde das aus der Röhre ausströmende Leuchtgas entzündet, so nahm die Flamme eine Gestalt an, die an das Aussehen einer kannelierten Röhre erinnerte.

Ebenfalls unter Benutzung von erhitzten Drahtnetzen, jedoch in etwas anderer Art, gelang es Montenat[2]), eine Röhre zum Tönen zu bringen, und zwar gleichfalls zum anhaltenden Tönen. Er ließ nämlich in einer langen vertikalen Metallröhre ein kleines Drahtkörbchen mit glühenden Kohlen bis an das untere Ende hinab. Die Kohlen werden durch den aufsteigenden Luftstrom angefacht, glühen daher recht lebhaft und die Dauer des Tones ist ziemlich beträchtlich. Befindet sich das Drahtkörbchen an geeigneter Stelle der oberen Rohrhälfte, so entsteht statt des Grundtones der erste Oberton.

---

[1]) A. Kundt, Über einige Arten der Erzeugung von Tönen durch Flammen. Pogg. Ann. **128**, 614 bis 621, 1866.

[2]) Montenat, Sur une expérience analogue à celle des flammes chantantes. Compt. rend. **84**, 33. Ref. Beibl. **1**, 123 und Fortschr. d. Phys. f. 1877.

Außer Wiederholung sämtlicher obiger Versuche gelang es dem Verfasser, ein Tönen von Glasröhren 1. dadurch zu erreichen, daß unmittelbar unter dem in der Röhre angebrachten Drahtgitter ein kurzer Lichtbogen hergestellt wurde, der das Drahtnetz teilweise zum Glühen brachte, 2. daß ein Rost von parallelen Platindrähten durch einen elektrischen Strom auf hoher Temperatur erhalten wurde, und 3. daß eine mit zahlreichen kleinen Löchern versehene Kupferscheibe innerhalb der Klangröhre zum Glühen gebracht wurde.

Eine Erklärung für das Zustandekommen des Tönens haben Rijke, Lord Rayleigh und Ciamician gegeben. Kundt macht zwar in seinen „Vorlesungen über Experimentalphysik“ eine Andeutung über die Entstehungsweise des Tönens beim Rijkeschen Versuche, doch ist dieselbe wohl zu allgemein gehalten, um als ein Erklärungsversuch bezeichnet werden zu können. Er erinnert nämlich an die rhythmischen Bewegungen, die von einer nicht ganz geschlossenen Ofentür ausgeführt werden, und das Geräusch, welches hierbei vom brennenden Ofen ausgeht. Rijke[1]) nimmt an, daß die das Metallnetz durchstreichende Luft, indem sie sich an diesem erhitzt, sich ausdehnt und bei der Berührung mit der kalten Rohrwandung wiederum zusammenzieht. „Diesen folgeweisen Ausdehnungen und Zusammenziehungen muß man nun die Erzeugung des Tones zuschreiben.“ Ciamician[1]) geht davon aus, daß die Summe aller Lücken des Netzes kleiner sei als die untere Öffnung der Klangröhre, daher entstehe in dem aufsteigenden Luftstrome eine Verdichtung unterhalb des Netzes, wobei die Reibung der Luft an den Drähten vielleicht tonbegünstigend wirke. Oberhalb des Netzes entstehe wegen des Geschwindigkeitszuwachses, den das heiße Netz den Luftteilchen vermittelt, eine momentane Verdünnung, in welche die unterhalb des Netzes angestaute und daher verdichtete Luft hineinströme und dank der Trägheit eine Verdichtung erzeuge, während sich indessen unterhalb des Netzes eine Verdünnung bilde. Die hierauf nachrückende Luft hebe jene Verdünnung nicht nur auf, sondern erzeuge sogar eine neue Verdichtung und der ganze Vorgang wiederhole sich von neuem. — Es soll am Schlusse dieser Arbeit ausführlicher auf die Ursachen der Tonentstehung eingegangen werden, an dieser Stelle aber sei bereits bemerkt, daß die Rijkesche Erklärung bei aller ihrer Kürze mehr Beobachtungstatsachen berücksichtigt, als die von Ciamician gegebene. Daß z. B. die abkühlende Wirkung der Rohrwandungen sehr wesentlich ist, sieht man besonders deutlich, wenn man die Röhre, etwa durch elektrische Heizung eines Drahtrostes, zu dauerndem Tönen bringt. In diesem Falle wird nämlich das Tönen allmählich schwächer und hört schließlich ganz auf, wenn sich die Rohrwandungen genügend erhitzt haben, und nur eine Abkühlung der Rohrwandungen oder Tem-

[1]) l. c.

peratursteigerung des Drahtrostes kann eine Fortdauer des Tones bewirken. Andererseits ist es nicht unerläßlich, daß die Summe der Drahtlücken kleiner sei als die untere Rohröffnung, denn eine sich nach unten stark verengernde Röhre, bei welcher sich das Drahtnetz im weiteren Teile befindet, tönt ebenfalls recht gut, falls nur die Weite der Maschenöffnungen und ihr gegenseitiger Abstand innerhalb gewisser, ganz bestimmter Grenzen liegen, wie dies bei jeder Röhrenform der Fall sein muß.

Die von Lord Rayleigh stammende Erklärung bezieht sich nicht so sehr auf das Zustandekommen des Tönens, als vielmehr auf die Art, wie ein bereits zustande gekommener Ton aufrecht erhalten wird.

Rayleigh[1]) schreibt nämlich inbezug hierauf[2]): „At the limit of the inwards motion, i. e. at the phase of greatest condensation, a small quantity of air comes into contact with the metal, which had not done so before, and is accordingly cool; and the heat communicated to this quantity of air acts in the most favourable manner for the maintenance of the vibration. — A quite different result ensues if the gauze be placed in the upper half of the tube. In this case the fresh air will come into the field at the moment of greatest rarefaction, when the communication of heat has an unfavourable instead of a favourable effect. The principal note of the tube therefore cannot be sounded. — A complementary phenomenon discovered by Bosscha and Riess may by explained upon the same principles. If a current of hot air impinge upon cold gauze, sound is produced; but in order to obtain the principal note of the tube the gauze must be in the upper, and not as before in the lower, half of the tube.“ D. h.: Beim Grenzfalle der nach Innen gerichteten Bewegung, nämlich in der Phase der größten Verdichtung, kommt eine kleine Luftmenge, welche dies vorher nicht getan hatte und somit kühl ist, in Berührung mit dem Metall, und die Wärme, welche dieser Luftmenge mitgeteilt wird, sorgt in der günstigsten Weise für die Aufrechterhaltung der Schwingung. Ein ganz anderes Ergebnis erhält man, wenn das Netz in die obere Röhrenhälfte eingeführt wird. In diesem Falle wird die kalte Luft im Augenblicke der größten Verdünnung in den Wirkungsbereich gelangen, wo dann die Mitteilung von Wärme einen ungünstigen statt eines günstigen Einflusses ausübt. Der Grundton der Röhre kann daher nicht ertönen. — Eine komplementäre Erscheinung, die von Bosscha und Riess entdeckt worden ist, kann

[1]) The explanation of certain acoustical phenomena. Nature **18**, 319 bis 321, 1878.

[2]) Da es mir erst nach einigen Bemühungen gelungen ist die Rayleighsche Originalabhandlung zu erhalten, ein auf dieselbe bezügliches Referat in den „Beiblättern“ jedoch in vielen Stücken andere Angaben macht, was mich zur Ausführung mancher Versuche mit negativem Resultate veranlaßt hatte, so habe ich den Originaltext hier wörtlich zitieren zu müssen geglaubt.

nach denselben Grundsätzen erklärt werden. Wenn ein Strom heißer Luft auf das kalte Netz trifft, entsteht ein Ton; um aber den Grundton der Röhre zu erhalten, muß das Netz in der oberen und nicht wie vorher in der unteren Rohrhälfte angebracht sein.

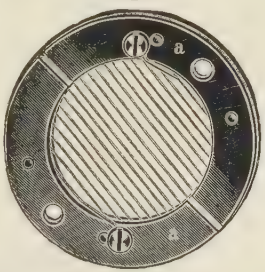
Die auf den folgenden Seiten erwähnte elektrische Pfeife und einige Versuche mit derselben, die in der vorliegenden Arbeit meist übergangen sind, finden sich beschrieben im Korrespondenzblatte des Naturforschervereins zu Riga, Heft **46**, 37 bis 40, **47**, 46 bis 56 und **48**, 139 bis 144.

§ 2. Beschreibung der elektrischen Pfeife.

Wie man den bekannten Apparat, bei welchem ein Elektromagnet den Klöppel einer Glocke in Bewegung setzt, als elektrische Klingel bezeichnet, so kann man die folgende Vorrichtung eine elektrische Pfeife nennen, obgleich auch hier die Elektrizität nur indirekt in Wirksamkeit tritt und nur zur Erhitzung eines Drahtes dient.

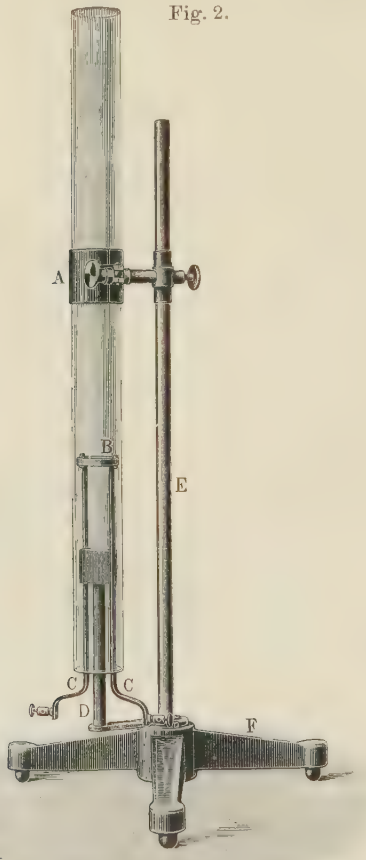
Der wesentlichste Teil des ganzen Apparates besteht aus einem Drahtroste (Fig. 1), welcher derart hergestellt ist, daß ein dünner Platindraht in zahlreichen parallelen Windungen zwischen zwei Asbestringen hin und her geführt ist. Noch haltbarer waren die Drahtroste, bei denen ein aus einer dicken Glimmerplatte herausgeschnittener Ring als Halter des Platindrahtes diente; letzterer konnte hierbei viel straffer gespannt werden und seine Windungen ließen sich, ohne sich gegenseitig zu berühren, recht nahe aneinander vorbeiführen. Die Asbest- bzw. Glimmerringe dienen gleichzeitig zur Isolierung der einzelnen Drahtwindungen und als Stütze für dieselben. zusammengehalten werden sie durch vier halbkreisförmige Messingplättchen *a*, die einander nicht berühren und von welchen die übereinander gelegenen durch Messingschrauben miteinander leitend verbunden sind. Die Enden des Platindrahtes sind an je eines der Messingplättchen angeschlossen. Getragen wird der ganze Ring mit dem Heizdrahte (Fig. 2, *B*) von zwei durch einen Würfel aus Schiefer voneinander getrennten Messingstäbchen *C*, an deren Enden sich die Klemmschrauben für die Leitungsdrähte befinden. Der Träger *D* verbindet den ganzen Apparatteil mit dem Dreifuß *F*. Auf letzteren ist auch ein Eisenstab *E* aufgeschraubt, an dem die Hülse *A* in beliebiger Höhe festgeklemmt werden kann. Innerhalb jener Hülse läßt sich eine über den Heizrost gestülpte Röhre verschieben und in beliebiger Höhe befestigen. Die Länge der Stäbchen *C* betrug in dem zuerst hergestellten Apparate

Fig. 1.



etwa 20 cm, da es sich aber als notwendig erwies, den Heizrost durch die Klangröhre ihrer ganzen Länge nach hindurchzuführen, so wurde zu diesem Zwecke ein besonderer Apparat hergestellt, welcher eine ähnliche Einrichtung wie der beschriebene besaß, bei welchem jedoch die den Heizrost tragenden Metallstäbchen mehr als 1 m Länge hatten. Für Klangröhren von sehr bedeutender Länge bzw. Weite wurden geeignete Stative verwendet. Auf den Klangröhren, an denen gewisse Abstände gemessen werden mußten, war eine Skala aus Millimeterpapier aufgeklebt, so daß jene Abstände bis auf Bruchteile eines Millimeters abgelesen werden konnten.

Fig. 2.



§ 3. Dimensionen der Heizgitter.

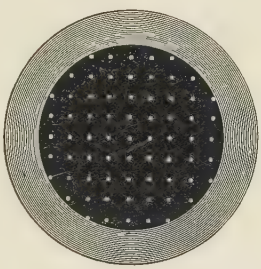
Da die Drahtroste wegen des Platins recht kostspielig sind, wurde eine nur geringe Anzahl derselben angefertigt. Die Stärke der Drähte variierte dabei zwischen 0,2 und 0,5 mm, der mittlere Abstand der einzelnen Windungen zwischen 0,5 und 1,5 mm. Die Roste mit enger aneinander liegenden Windungen gaben im allgemeinen kräftige Töne, hatten aber den Übelstand, daß sich nach mehrfachem Gebrauche des Rostes mehrere Windungen berührten, der Strom daher nicht mehr durch die ganze Länge des Platindrahtes ging. Es dehnten sich nämlich die Drahtwindungen während der Erhitzung so stark aus, daß sie, da ihre Enden in den Asbestringen festlagen, sich nach den Seiten hin verbiegen mußten.

Um ein Urteil darüber zu gewinnen, bei welcher Minimal- bzw. Maximalentfernung der Drähte an den Heizgittern, letztere eben noch tonerregend wirken, wurden Netze aus Messing- sowie Eisendraht, wie

sie käuflich sind, benutzt und an einer Bunsenflamme erhitzt. Dabei zeigte sich, daß bei einer Weite der Maschenlücken, welche weniger als 0,1 mm oder mehr als 4 mm betrug, ein Tönen nicht zu erzielen war, einerlei wie groß im Verhältnis zur Summe der Netzlücken die untere Öffnung der Röhre war. Bei sehr geringer Weite der Netzlücken (0,12 mm) erklang übrigens auch nur dann ein Ton, wenn man die Röhre, nachdem die Heizflamme aus ihr entfernt war, kräftig abwärts stieß. Dies Mittel erwies sich auch dann als wirksam, wenn eine Röhre mit gröberem Drahtnetz wegen Erkaltens des letzteren zu tönen aufgehört hatte. Die Erklärung hierfür ist wohl die folgende: ist die Maschenweite zu gering, so findet der Konvektionsstrom einen zu großen Widerstand und kann daher das Netz nicht mit gehöriger Kraft durchsetzen, ist dagegen die Temperatur des Drahtnetzes zu gering geworden, so hat sich auch die Intensität des Konvektionsstromes so weit verringert, daß sie zur Aufrechterhaltung der Luftvibrationen nicht mehr hinreicht. In beiden Fällen bewirkt ein kräftiges Abwärtsbewegen der Klangröhre eine Verstärkung des Konvektionsstromes.

Auch die Abstände der einzelnen Netzlücken voneinander durften nicht zu groß gewählt werden. Mit einem Doppelroste aus 2,3 mm dicken Messingdrähten, welche derart übereinander gelötet waren, daß die nahezu quadratischen Lücken zwischen den Drähten eine Seitenlänge von 0,5 mm hatten, gelang es mir nur selten eine Röhre zum Tönen zu bringen, falls jener Doppelrost (Fig. 3) erhitzt war; dagegen konnten mit eben dieser Vorrichtung Abkühlungstöne (siehe § 12) sehr wohl hervorgebracht werden. Auch bei den durchlöcherten Kupferscheiben, die, wie eingangs erwähnt, zur Tonerzeugung benutzt wurden, mußten die Abstände der einzelnen Löcher voneinander gering sein, kleiner als 2 mm, je geringer sie waren, um so leichter sprach das Tönen an. Die Heizroste der elektrischen Pfeife hatten alle nahezu die gleichen Dimensionen, der äußere Durchmesser der ringförmigen Fassung (Fig. 1, *a*) schwankte zwischen 33 und 34 mm, der innere betrug ungefähr 22 bis 28 mm. Da der mittlere Abstand zweier Drahtwindungen voneinander 1 mm betrug, so bestanden die Roste aus 16 bis 18 Windungen. Nur bei einigen Rosten war die Zahl der Windungen erheblich geringer, aber auch diese waren durchaus brauchbar. Theoretisch gesprochen müßten zwei Drahtwindungen mit entsprechendem beiderseitigen Abstande zur Tonerzeugung vollkommen hinreichen, in praxi aber erwies sich eine so geringe Zahl als unzureichend. Durch Ausschaltung einer immer größeren Zahl von Drahtwindungen konnte man sich davon überzeugen, daß ein Tönen der Röhren noch eintrat, wenn bloß 3 bis 4 Drähte

Fig. 3.



vom elektrischen Strome durchflossen und daher glühend waren; die angrenzenden Drahtwindungen waren dabei freilich nicht kalt, doch war ihre Temperatur jedenfalls zu niedrig, um tonerzeugend zu wirken. Je mehr Drahtwindungen glühten, um so lauter war bei der gleichen Stromstärke der entstehende Ton, was ja ohne weiteres verständlich ist.

§ 4. Dimensionen der Klangröhren.

Die geringste Weite der zu den Versuchen benutzten Röhren betrug etwa 34 mm, da die Drahtroste in engere Röhren nicht eingeführt werden konnten; die weitesten Röhren hatten einen inneren Durchmesser von 60 mm. Die Länge der Klangröhren wurde zwischen 25 und 152 cm variiert. Bei den längsten und weitesten Röhren war es nicht ganz leicht ein Tönen zu erhalten, namentlich gilt dies für den Fall, wo die Weite im Verhältnis zur Länge recht bedeutend war, also für die Klangröhren von sehr weiter Mensur. Die Mensur durfte bei den elektrischen Pfeifen nicht größer als $^1/_7$ sein.

Rijke macht bezüglich seiner Versuche die Angabe, daß die Länge der Klangröhren nicht weniger als 20 cm betragen dürfe. Dies ist in der Tat der Fall, wenn die Weite der Röhren relativ groß ist und hängt wohl mit der Beobachtung zusammen, die wir soeben über den Maximalwert der Mensur mitteilten. Wählt man jedoch engere Röhren, so kann ihre Länge auch viel geringer als 20 cm sein und man erhält trotzdem ein Tönen derselben. Da meine durch den elektrischen Strom geheizten Platindrahtroste, wie erwähnt, einen Durchmesser von 33 bis 34 mm hatten, benutzte ich für Röhren von geringerer Weite einfache Drahtnetze und erhitzte dieselben, da eine Bunsenflamme in so enge Röhren nicht eingeführt werden konnte, mittels einer schmalen Stichflamme. Die kleinsten der Röhren, bei denen auf diese Weise ein Tönen zu erzielen war, hatten 14,8 cm Länge und 1,8 cm Weite.

§ 5. Stellung der Klangröhren.

Daß der aufsteigende Konvektionsstrom für das Tönen der Röhren unerläßlich ist, erkennt man am einfachsten aus der Tatsache, daß ein Verschließen einer der Rohrmündungen ein sofortiges Verstummen des Tones zur Folge hat. Demgemäß ist es am günstigsten, wenn die Klangröhren sich in vertikaler Stellung befinden; indes können sie auch ziemlich stark gegen die Vertikale geneigt werden, ehe der Ton verstummt. Auf diesen Umstand wird an dieser Stelle eingegangen, weil man bisweilen, bei Beschreibungen des Rijkeschen Versuches, der Angabe begegnet, das Klangrohr müsse sich in vertikaler Stellung befinden. Diese Angabe ist jedenfalls nicht zutreffend, man kann vielmehr das Klangrohr um 50 bis 60° aus der Vertikalstellung herausdrehen, ohne

daß das anhaltende Tönen aufhört; hat das Tönen der elektrischen Pfeife seine maximale Stärke erreicht, so muß das Klangrohr um 75 bis 80° gegen die Vertikale geneigt werden, damit der Ton erlischt. Mit einer 50 cm langen Röhre gelang es sogar anhaltendes Tönen bei freilich recht intensivem Glühen der Drähte zu bekommen, während die Achse der Röhre unter 86° gegen die Vertikalrichtung geneigt war; nahm dann diese Neigung noch um 1 bis 2° zu, so verstummte das Tönen fast momentan. In horizontaler Stellung tönt die Pfeife unter keinen Umständen, wie stark auch das Heizgitter erhitzt sein mag. In dieser Beziehung unterscheidet sich die elektrische Pfeife (und die Rijkeschen Drahtnetzpfeifen) nicht nur von den Orgelpfeifen und anderen Blasinstrumenten, sondern auch von der chemischen Harmonika, die in horizontaler Stellung noch sehr wohl tönt.

Im weiteren wird die Rede davon sein, daß ein in die Röhre hineingeblasener Luftstrom je nach Umständen das Tönen verhindert oder begünstigt. Bläst ein solcher Luftstrom von derjenigen Rohrmündung aus, welche der den Heizrost enthaltenden Rohrhälfte angehört, so bringt er bei geeigneter Geschwindigkeit ein andauerndes Tönen der Röhre zustande, auch wenn sich die Achse derselben in genau horizontaler Lage befindet. Diese Erscheinung findet wohl darin ihre Erklärung, daß der hineingeblasene Luftstrom die erhitzte Luft aus der Röhre treibt, so daß sich eine Bewegungskomponente von genügender Größe parallel zur Rohrachse ergibt. Durch direkte Messung wurde gefunden, daß die günstigste Geschwindigkeit für den hineinzublasenden Luftstrom nahezu gleich derjenigen ist, mit welcher der Konvektionsstrom bei vertikaler Stellung der Röhre aus ihrem oberen Ende heraustritt.

§ 6. Lage des Heizrostes.

Wie schon Rijke angibt und die anderen Beobachter nach ihm behaupten, ist die günstigste Lage des Heizgitters um ein Viertel der Rohrlänge vom unteren Rohrende entfernt. Diese Angabe bezieht sich auf den Grundton und erklärt sich unter der Annahme, daß sich am Röhrenende ein Schwingungsbauch, in der Rohrmitte der Schwingungsknoten befindet. Im Schwingungsknoten ist ein Minimum der Luftbewegung vorhanden, während am Heizroste, als der Erregungsstelle des Tones, die Luftbewegung recht intensiv sein muß. Andererseits sind am Schwingungsbauche die Dichteänderungen minimal, während sie am Heizroste sehr bedeutend sein müssen. Daraus würde es sich denn wohl erklären, daß der Mitte zwischen Knoten und Bauch, als der Stelle wo bei relativ größter Luftbewegung auch die Dichtewechsel möglichst groß sind, die günstigste Lage des Heizrostes entspricht.

Um die Frage nach der günstigsten Lage des Drahtrostes genauer zu prüfen, wurde zunächst untersucht, bei welcher Lage desselben die

Röhre noch tönte, obgleich sich die Stärke des durch den Heizrost gesandten Stromes nahe der untersten noch zulässigen Grenze befand. Diese Versuche erwiesen sich aber als weniger geeignet wie die folgenden: es wurde die Zeitdauer bestimmt, welche nach erfolgtem Stromschluß verstrich, bis das Tönen auftrat. Je schwächer hierbei der Strom war, um so größer war jenes Zeitintervall; bei konstanter Stromstärke zeigte es sich im direkten Zusammenhange mit der Lage des Heizrostes. Man ersieht dies aus der folgenden Tab. I, in welcher jede Zahl das arithmetische Mittel aus fünf Einzelbeobachtungen darstellt. Zu den Versuchen diente eine gläserne Klangröhre von 40,8 cm Länge und 3,5 cm innerem Durchmesser; die Stromstärke wurde ziemlich konstant erhalten und betrug 5,2 bis 5,3 Amp., diese geringen Schwankungen der Stromstärke waren auf die Beobachtungsmittel ohne Einfluß. Mit „h“ ist der Abstand des Heizrostes vom unteren Rohrende, mit „t“ das Zeitintervall bezeichnet, welches zwischen dem Momente des Stromschlusses und dem Momente lag, in welchem der Ton eben hörbar wurde.

Tabelle I.

h cm	t sec	h cm	t sec
13,5	10,2	8,0	3,8
13,0	7,8	7,5	3,9
12,5	7,1	7,0	4,1
12.0	6,0	6,5	4,8
11,5	5,4	6,0	4,9
11,0	5,5	5,5	5,0
10,5	5,3	5,0	7,2
10,0	5,1	4,5	9,7
9,5	4,7	4,0	11,7
9,0	4,6	3,5	18,4
8,5	4,3		

Wie aus obiger Tabelle ersichtlich, entspricht die kürzeste Dauer der Tonentwickelung einem Abstande des Heizrostes vom unteren Rohrende gleich 8 cm. Eine Bestätigung dieses Resultates findet man in der folgenden Tabelle, wo dieselben Größen wie vorhin gegeben sind und auch die Bestimmungsmethode die gleiche ist, nur wurden bei dieser Versuchsreihe die Abstände des Heizrostes vom Röhrenanfang jedesmal um 0,1 cm geändert. Damit bei so geringen Verschiebungen des Rostes eine merkliche Änderung in der Dauer der Tonentwickelung zutage trete, war es erforderlich durch den Rost einen entsprechend schwächeren Strom zu senden und hierdurch das zu messende Zeitintervall zu vergrößern. Die Stromstärke betrug jetzt 4,8 bis 4,9 Amp.: h und t haben die frühere Bedeutung.

Tabelle II.

h cm	t sec	h cm	t sec
8,6	14,5	8,0	8,6
8,5	13,2	7,9	8,7
8,4	9,8	7,8	9,7
8,3	9,6	7,7	14,6
8,2	8,9	7,6	15,4
8,1	**8,5**	7,5	15,8

Nach Tab. II erfolgt die Tonentwickelung am schnellsten, wenn der Heizrost um 8,1 cm vom Röhrenanfang absteht, und hat man demnach diese Stellung des Heizrostes als die günstigste anzusehen; es möge der Kürze halber der günstigste Abstand des Rostes vom Röhrenanfang mit h' bezeichnet werden. Da in unserem Falle die Länge der Klangröhre $l = 40{,}8$ cm war, so ist $h' = 0{,}198\, l$ oder nahezu $h' = \frac{1}{5} l$. Rijke, Ciamician u. a. haben für die Drahtnetzröhren den Wert $h' = \frac{1}{4} l$ angegeben.

Daß bei einer offenen, tönenden Röhre die Enden der schwingenden Luftsäule nicht mit den Rohrenden zusammenfallen, sondern außerhalb der Röhre liegen, ist eine längst bekannte Tatsache. Schon Chladni[1]) vermutete, daß die in Orgelpfeifen „schwingende Luftsäule ein wenig länger sei, als die Länge der Röhre, worin sie enthalten ist". Nach Cavaillé-Coll muß man zur Länge einer offenen Orgelpfeife die Größe $\frac{5}{3} d$, wo d den Querdurchmesser der Röhre bedeutet, hinzufügen, um das Gesetz von der Proportionalität von Pfeifenlänge und Schwingungszahl bestätigt zu finden. Nach Helmholtz[2]) beträgt die Differenz zwischen der reduzierten und wahren Pfeifenlänge für zylindrische Pfeifen $\frac{\pi}{8} d = 0{,}3927\, d$, welcher Wert bedeutend kleiner ist als der von Cavaillé-Coll angegebene. Übrigens schwankt jene Differenz nach Wertheim und Zamminer zwischen den ziemlich weiten Grenzen $0{,}247\, d$ und $0{,}424\, d$, es ist daher nicht zu verwundern, wenn von verschiedenen Experimentatoren bisweilen recht differente Angaben gemacht werden, so hat z. B. Stücker[3]) neuerdings den Wert $0{,}2615\, d$ als Mittel aus seinen Beobachtungen gefunden. Nach Hopkins (Über die Schwingung der Luft in zylindrischen Röhren, Trans. of the

[1]) E. F. Chladni, Die Akustik, § 73, S. 69, 1830.

[2]) H. Helmholtz, Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden, 1859. Auch Ostwalds Klass. Nr. 80, S. 14.

[3]) N. Stücker, Über die Lage der Knotenpunkte in einseitig geschlossenen Röhren. Wien. Ber. **116**, 1241, 1907.

Cambridge Royal Phil. Soc., Vol V, pt. II, p. 231, auch Pogg. Ann. **44**, 246 u. 603, 1838) ist der Abstand des Schwingungsbauches vom Ende der Pfeife außer vom Durchmesser auch von der Länge derselben abhängig; diese letztere Abhängigkeit ist in der Helmholtzschen Arbeit nicht zu finden, obgleich die von Hopkins mitgeteilten Zahlen sie sehr wahrscheinlich machen. Es soll nun im folgenden die Annahme gemacht werden, der Schwingungsbauch einer offenen zylindrischen Röhre liege im Abstande $\frac{\pi}{8} d$ vom Rohrende, entsprechend der Helmholtzschen Korrektionsgröße und der Heizrost müsse sich, um möglichst günstig zu wirken, genau in der Mitte zwischen Bauch und Knoten befinden. Wie im späteren gezeigt werden soll, ist der Abstand des Schwingungsknotens vom unteren Ende der elektrischen Pfeife wahrscheinlich gleich $0{,}47\, l$, wo l die wahre Rohrlänge bedeutet Die Mitte zwischen Bauch und Knoten hätte demnach von Röhrenanfang den Abstand $0{,}235\, l - \frac{\pi d}{16}$. Benutzt man diesen Ausdruck zur Ermittelung der günstigsten Lage h' des Heizrostes und schreibt h':

$$h' = 0{,}235\, l - \frac{\pi d}{16} = 0{,}235\, l - 0{,}196\, d,$$

so erhält man in drei Fällen, wo eine direkte Bestimmung der günstigsten Stellung des Heizrostes ausgeführt worden war, folgende Zahlen.

Tabelle III.

l cm	d cm	h' cm beob.	h' cm ber.	Unterschied cm
40,8	3,5	8,1	8,9	0,8
45,7	3,5	9,5	10,1	0,6
85,0	3,6	19,6	19,3	— 0,3

Die Übereinstimmung ist zwar keine sehr gute, doch ist es immerhin recht wahrscheinlich gemacht, daß sich unsere Formel der Wahrheit nahe befindet, ist doch auch der Wert des Faktors 0,235 gewiß nicht ganz genau.

Rückt man den Heizrost aus der günstigsten Stellung heraus und nähert ihn der Röhrenmitte oder dem unteren Rohrende, so wird das Ansprechen des Tones allmählich schwieriger und gelingt endlich nur, falls man gleichzeitig die Temperatur des Heizrostes steigert. Aus diesem Grunde und wegen eintretender Verschiebung des Schwingungsknotens nimmt die Höhe des Röhrentones allmählich etwas zu, und kann auf diese Weise eine Tonerhöhung von mehr als einem halben Tone erreicht werden. Die extremsten Lagen des Heizrostes, bei denen noch

der Grundton ansprach, betrugen für eine Röhre von 40,8 cm Länge und 3,6 cm Durchmesser, 1,6 bzw. 14,4 cm Abstand vom unteren Röhrenende ($h = 0{,}04\,l$ bzw. $0{,}35\,l$). In Röhren von größerer Länge treten bei starker Annäherung des Rostes an das untere Rohrende Obertöne auf, in ihnen läßt sich jedoch der Rost noch höher hinaufrücken, und sprach beispielsweise eine 149 cm lange, 3,5 cm weite Röhre noch mit dem Grundtone an, während der Abstand des Heizrostes vom Röhrenanfange 0,389 der Röhrenlänge betrug.

Befindet sich der Heizrost in der oberen Rohrhälfte, so gelingt es nicht den Grundton der Pfeife zu erhalten, wohl aber — genügende Länge der Pfeife vorausgesetzt — einen der Obertöne. Als Bedingung für das Tönen ergibt sich nämlich unter anderem, daß der Heizrost sich stets unterhalb eines Schwingungsknotens befinden muß. Diese Bedingung ist für den Grundton nicht erfüllt, wenn sich der Heizrost in der oberen Rohrhälfte befindet, und deshalb spricht auch der Grundton in diesem Falle nicht an, wenigstens nicht unmittelbar. Bläst man jedoch, während der Rost diese Lage hat, kräftig über das obere Rohrende hin, so tritt der Grundton sofort sehr kräftig und vollklingend auf, erlischt aber in demselben Augenblicke, wo das Blasen unterbrochen wird. Von dem schwachen, geräuschartigen Tone, den man durch Anblasen eines Endes einer beiderseits offenen Röhre erhält, ist jener Ton durchaus verschieden, auch kommt er nicht zustande, wenn der Heizrost, währernd des Anblasens nicht genügend stark erhitzt ist. Man hat es demnach mit einem Eigentone der elektrischen Pfeife, nicht etwa mit einem Resonanztone zu tun. Die Bedeutung des über das Pfeifenende hinweg geblasenen Luftstromes mag darin bestehen, daß er die aufsteigende, erhitzte Luft zur Rückkehr ins Innere der Pfeife zwingt und ihre Bewegung hierdurch periodisch macht. Bei Anwesenheit eines solchen Luftstromes ist es möglich, die Röhre mit dem Grundtone ertönen zu lassen (bei geringer Länge im Verhältnis zum Röhrendurchmesser kommen Obertöne in der elektrischen Pfeife überhaupt nicht zustande), während sich der Heizrost zwischen etwa $0{,}635\,l$ und $0{,}82\,l$ befindet. Somit findet man, daß sich der Heizrost in der unteren Rohrhälfte innerhalb eines Intervalls von $0{,}31\,l$, in der oberen Rohrhälfte — bei gleichzeitigem Vorhandensein eines künstlichen Luftstromes — nur um das Intervall $0{,}19\,l$ verschieben darf.

In allen obigen Fällen war die Ebene des Heizrostes normal zur Achse der Klangröhre. Um zu untersuchen, in welcher Weise eine andere Stellung des Rostes wirkt, wurden die Platinroste mit seitlichen Durchbohrungen versehen, wodurch sie um eine horizontale Achse, welche gleichzeitig die Stromzuleitung bewirkte, gedreht werden konnten. Es ist vorauszusehen, daß eine solche Drehung des Rostes, falls die Achse den Platindrähten parallel ist, im wesentlichen denselben Einfluß ausüben muß, wie eine Verringerung des Abstandes zwischen

den Drähten. Ist dagegen die Drehungsachse senkrecht zu den Platindrähten, so findet der Konvektionsstrom bei jeder Stellung des Rostes gleichbreite Zwischenräume zwischen den Drähten, nur sind diese gewissermaßen kürzer geworden.

Es zeigte sich bei den diesbezüglichen Versuchen, daß die Röhre, falls der Rost kräftig glühte, noch zu tönen vermochte, wenn die Rostebene um weniger als 60° aus ihrer normalen, horizontalen Lage herausgedreht worden war, daß jedoch der Zeitraum t, welcher zwischen dem Momente des Stromschließens und dem Auftreten des Tönens verstrich, um so größer wurde, je kleiner der Winkel α war, welchen die Rostebene mit der Rohrachse bildete. So wurden beispielsweise folgende Zahlen gefunden, die zur Illustrierung des Gesagten dienen mögen:

α^0	= 90	60	50	35,
t^{sec}	= 2,6	4,3	5,3	7,0.

War $\alpha = 30^0$, so tönte die Röhre nicht mehr, obgleich die Drähte intensiv glühten, doch befand sich die Luftsäule jetzt in jenem labilen Zustande, über welchen an anderer Stelle dieser Arbeit berichtet ist. Lautere Geräusche, namentlich tiefere Töne, bewirkten jedesmal ein Ansprechen des Röhrentones, doch verstummte letzterer gleich wieder, nachdem die auslösende Ursache zu wirken aufgehört hatte.

Es braucht wohl kaum betont zu werden, daß der obige Wert $\alpha = 30^0$ nicht etwa einen absoluten Grenzwert darstellt, sondern daß sich je nach den Dimensionen der Roste, dem Abstande der Drahtwindungen usw. andere Grenzwerte werden ergeben müssen.

§ 7. Röhrensubstanz.

Meist wurden gläserne Klangröhren zu den Versuchen benutzt, was den Vorzug hat, daß man hierbei auch die im Inneren der Röhren sich abspielenden Vorgänge beobachten kann. Außerdem sprechen gläserne Röhren meist leichter an und erhitzen sich wegen der geringen Leitfähigkeit des Glases nicht allzu schnell, was wiederum auf die Dauer des Tönens günstig einwirkt. Außer gläsernen Röhren wurden gelegentlich auch solche aus Eisenblech, Pappe, steifem Kartonpapier und aus hartem Schlauchgummi benutzt. Die Blech- und Pappröhren wurden hinsichtlich des Tonklanges mit einer Glasröhre von denselben Dimensionen derart verglichen, daß in den gleichen Stromkreis je zwei Pfeifen parallel geschaltet wurden und durch eine Vorrichtung in der Art eines Morsetasters sehr schnell nacheinander mit Strom beschickt wurden. Die Länge der benutzten Röhren betrug ungefähr 50 cm; da bei einer solchen Rohrlänge, wie später ausgeführt werden soll, Obertöne meist überhaupt nicht gesondert hervorzubringen sind, hatte man es mit obertonarmen, wenn nicht gar obertonfreien Klängen zu tun. Demgemäß konnte auch eine Klangverschiedenheit der Töne, trotz des

verschiedenen Röhrenmaterials, nicht erkannt werden, wie eine solche bei Orgelpfeifen aus verschiedenem Material ja bekanntlich sehr stark bemerkbar wird. — In Röhren aus steifem Kartonpapier war es am schwersten ein Tönen zu erhalten, nächstdem kommen Röhren aus dünner Pappe. Dickwandige Glasröhren tönen auch dann noch sehr gut, wenn sie starke Sprünge haben, bei dünnwandigen verhindert bisweilen ein kleiner Sprung in den Wandungen das Tönen vollständig.

§ 8. Lage der Knoten und Bäuche.

Bei einer offenen Orgelpfeife befindet sich, während der Grundton erklingt, der Schwingungsknoten nicht in der Rohrmitte, wie man dies vielfach angegeben findet, sondern unterhalb der Mitte[1]). Unter anderen ist hierauf von H. Smith[2]) hingewiesen worden. Hensen[3]) gibt an, daß sich nach Friedrich[4]) ein Hauptübergang der in der Röhre schwingenden Massen von der Vorderwand zur Rückwand in zwei Fünftel der Pfeifenlänge vollzieht und sich hierselbst, also im Abstande 0,4 l vom Röhrenanfange die Knotenebene befinde. Den Grund für diese unsymmetrische Lage des Knotens sucht Hensen in dem Umstande, daß der Druck in der Knotenebene einer offenen Pfeife die Schallgeschwindigkeit um mehr als 10 Proz. vermindern könne. Ob diese Erklärung das Richtige trifft, soll hier nicht näher erörtert werden. In der chemischen Harmonika mit offenen Enden soll sich nach Bresina[5]) der Schwingungsknoten genau in der Mitte befinden; die zur Bestimmung seiner Lage angewandte Methode bestand darin, daß ein zugespitztes Stückchen Flittergold von 5 mm Länge und 2 bis 3 mm Breite in die Klangröhre hinabgesenkt und diejenigen Lagen aufgesucht wurden, in welchen es nicht in Bewegung geriet; es fand dies innerhalb eines Raumes statt, der im Mittel aus neun Beobachtungsreihen vom unteren Rohrende einen Abstand zwischen 0,47 und 0,53 l hatte. Das arithmetische Mittel aus diesen Abständen entspricht genau der Rohrmitte, doch erscheint es, wie wir im folgenden sehen werden, recht fraglich, ob man berechtigt ist, genau die Mitte zwischen jenen Grenzen als Knotenfläche anzusehen. Wahrscheinlicher

[1]) F. Melde in Winkelmanns Handbuch der Physik **1**, 755, 1891.

[2]) H. Smith, On some errors of statement concerning organ-pipes in recent treatises on natural philosophy. (Letter) Nat. 8, p. 45, 1873. — H. Smith, On the variability of the node in organ-pipes. Nat. 9, p. 301, 1874.

[3]) V. Hensen, Über den zur Unterhaltung von Tonschwingungen notwendigen Anstoß. Ann. d. Phys. **4**, 21, 789, 1906.

[4]) W. Friedrich, Über Entstehung des Tones der Labialpfeifen. Dr.-Diss. Rostock 1901.

[5]) Bresina, Über die Schwingungen der Luft in der chemischen Harmonika. Soest 1881, S. 12.

ist doch von vornherein anzunehmen, daß die Bewegung auf der der Flamme zugekehrten Seite, d. h. in der unteren Rohrhälfte, sich bereits in geringerem Abstande vom Schwingungsknoten bemerkbar macht, als auf der von der Flamme abgekehrten Seite, und daß mithin auch in der chemischen Harmonika, konstanten Röhrenquerschnitt vorausgesetzt, der Knoten unterhalb der Rohrmitte liegt.

Für die Rijkeschen Drahtnetzpfeifen wird ebenfalls die Angabe gemacht, es befinde sich der Knoten des Grundtons in der Rohrmitte. Dies dürfte jedoch auch nicht ganz zutreffen, die Versuche mit der elektrischen Pfeife, die im folgenden erwähnt werden sollen, machen es durchaus wahrscheinlich, daß auch in zylindrischen Drahtnetzpfeifen der Schwingungsknoten gewöhnlich unterhalb der Rohrmitte liegen wird.

Zur Bestimmung der Knotenlage in Orgelpfeifen ist eine große Anzahl von Methoden in Vorschlag gebracht worden. Es wurde versucht einen Teil derselben für die elektrische Pfeife zu benutzen, doch ergab sich hierbei, daß man mit den meisten Methoden immer nur einen Raum von größeren oder geringeren Dimensionen ermitteln konnte, innerhalb dessen sich der Schwingungsknoten befinden mußte.

Nach v. Lang[1]) hört man, wenn man das Ohr ganz nahe an eine tönende Pfeife heranbringt, den Ton an gewissen Stellen schwächer werden, an anderen seine größte Stärke erreichen; die erstgenannten Stellen entsprechen den Schwingungsbäuchen, die letzteren den Knoten. Auf diese Weise wurde an einer Röhre von 40,2 cm Länge gefunden, daß sich der Knoten innerhalb eines Raumes befinden müsse, dessen Begrenzungen vom unteren Rohrende die Abstände 0,393 resp. 0,577 *l* haben. Dies Intervall ist so groß, daß es keinen Schluß auf die Lage des Knotens selbst gestattet.

Ein Versuch mit Hilfe von Kieselstaub in einer in horizontaler Lage befindlichen elektrischen Pfeife, die mit Hilfe eines künstlichen Luftstromes tönend gemacht war (vgl. S. 11), den Knoten aufzufinden, war ganz resultatlos, indem sich die Bewegungen der vibrierenden Luft als viel zu schwach erwiesen, um den Kieselstaub von den Bäuchen fort und zum Knoten hin zu bewegen: nur in der Nähe der Rohrenden trat eine merkliche Bewegung des Pulvers auf.

Wurde Rauch in die Pfeife gebracht während dieselbe tönte, so hörte das Tönen auf solange der Rauch sehr dicht war und begann erst von neuem, wenn er bereits so durchsichtig geworden war, daß seine Bewegungen sich nicht mehr mit genügender Schärfe verfolgen ließen. Außer charakteristischen Bewegungen, die sich am Rauche erkennen ließen und im späteren noch erwähnt werden sollen, ließ sich nichts Besonderes beobachten, namentlich nichts, was zu einer sicheren Bestimmung der Knotenlage hätte dienen können.

[1]) V. v. Lang, Wied. Ann. **7**, 292. 1879.

Der Versuch den Raum, innerhalb dessen die Tonstärke ein Maximum wird, mit bloßem Ohr aufzufinden, hatte, wie angegeben, kein brauchbares Resultat geliefert; es wurde daher derselbe Versuch mit Hilfe eines kleinen Mikrophons wiederholt. Dasselbe bestand aus einer runden Glimmerplatte, an deren Mitte ein Stückchen Retortenkohle befestigt war; über letzterem befand sich ein zweites Stückchen Kohle, das an einem Drahte befestigt war. Eine Eingrenzung des den Knoten enthaltenden Raumes in besonders enge Grenzen gelang auch mit dieser Vorrichtung nicht. Überraschend war es jedoch, daß meist neben dem Grundtone, den die Pfeife angab, noch ein anderer Ton im Telephone gehört wurde und zwar die höhere Oktave, wenn sich die Glimmerplatte in 0,456 bis 0,476 *l* Höhe befand, darüber hinaus in 0,516 bis 0,615 *l* Höhe hörte man neben dem Grundtone auch dessen tiefere Oktave und bisweilen noch tiefere Untertöne. Das Auftreten dieser tieferen Töne ließe sich vielleicht dadurch erklären, daß die untere Kohle keine ganz gleichen Exkursionen machte und daher mit der oberen nicht bei jeder Schwingung zusammentraf, ähnlich wie eine tönende Stimmgabel, deren Fuß einer Tischplatte bis auf geringe Entfernung genähert ist, statt des Grundtons oder außer diesem die tiefere Oktave und noch tiefere harmonische Untertöne hören läßt. Was indes das Auftreten der höheren Oktave anlangt, so habe ich eine plausible Erklärung hierfür nicht gefunden; wie wir sehen werden, liegen die Stellen, an denen sich die Glimmerplatte des Mikrophons befand, wenn die höhere Oktave auftrat, besonders nahe dem Schwingungsknoten.

Wird in die elektrische Pfeife, während der Heizrost nur schwach glüht, der Ton daher nicht sehr kräftig erklingt, eine horizontale fast den ganzen Röhrenquerschnitt einnehmende Scheibe eingeführt, so erlischt das Tönen, jedoch nicht überall gleich schnell, sondern in Abhängigkeit davon, an welcher Stelle innerhalb der Pfeife sich jene Scheibe befindet. Am längsten erhielt sich das Tönen aufrecht, wenn die Scheibe sich in 0,46 bis 0,48 *l* befand.

Wurde die eben erwähnte Scheibe durch die ganze Röhre hindurchgeführt, so zeigte sich, daß sie das Tönen, falls dieses auch noch so kräftig war, zum Erlöschen brachte, außer in einem bestimmten Bezirk; dieser letztere muß den Schwingungsknoten enthalten, doch war er meist sehr ausgedehnt. Die engsten Grenzen, die sich auf diese Weise finden ließen, lagen in 0,431 und 0,558 *l* Höhe. Meist lagen sie jedoch viel weiter auseinander, und betrug das arithmetische Mittel der Grenzwerte vielfach 0,53 bis 0,55 *l*. Aus diesem Umstande und weil noch andere Versuche dafür zu sprechen schienen, wurde von mir anfänglich (vgl. Korrbl. d. Rig. Nat. Ver. 1906, S. 139, Lage der Schwingungsknoten der elektrischen Pfeife) die Ansicht ausgesprochen, der Knoten befinde sich oberhalb der Rohrmitte. Die angedeuteten Versuche bestanden im Folgenden. Es wurde eine fast den ganzen Röhrenquer-

schnitt einnehmende horizontale Scheibe aus unelastischem Materiale an verschiedene Stellen innerhalb der Röhre gebracht, hierauf der Heizrost mit Strom beschickt und der Zeitraum bestimmt, der zwischen Stromschluß und Ausbildung des Tones zu seiner vollen Stärke lag. Diese Versuche ergaben im Mittel aus einer recht großen Zahl von Beobachtungen, daß sich das Tönen am schnellsten ausbildete, wenn sich jene Scheibe in 0,53 bis 0,55 *l*, also jedenfalls oberhalb der Rohrmitte befand. Da vermutet werden konnte, daß jene Scheibe die Schwingungen innerhalb der Röhre am wenigsten behindern müsse, wenn sie sich möglichst nahe dem Schwingungsknoten befindet, so wurde die Stelle der schnellsten Tonentwickelung direkt als diejenige angesehen, an welcher sich der Schwingungsknoten befindet. Diese Annahme aber setzt sich in Widerspruch zum Folgenden. Am Knoten muß ein Minimum der Bewegung vorhanden sein, dieses aber tritt, wie die direkten Versuche zeigen, viel näher dem unteren Rohrende und meist innerhalb der unteren Rohrhälfte ein.

Das bekannte Verfahren von Savart, das später von Hopkins adoptiert wurde, mittels einer mit leichtem Sande bestreuten Membrane schwache Vibrationen innerhalb der Luft zu verfolgen, läßt sich auch auf die elektrische Pfeife anwenden. Freilich dürfen nur solche Substanzen zur Herstellung der Membranen verwandt werden, die große Elastizität besitzen und zugleich hohen Temperaturen Widerstand leisten können.

Benutzt wurden Membranen aus dünnstem Kupferblech, Glimmer und namentlich solche aus sehr dünner Aluminiumfolie; letztere wurden auf einem Drahträhmchen ausgespannt und mit recht feinkörnigem Meersand bestreut. Die Membranen wurden dann mittels besonderer Vorrichtung innerhalb der Röhre um meßbare Strecken gehoben oder gesenkt und diejenigen Höhen derselben notiert, in denen der Sand die geringste Bewegung zeigte, bzw. — bei sehr schwachem Tönen der Röhre — ganz in Ruhe zu verharren schien. Auf diese Weise ließ sich an acht Röhren von 40,2 bis 146,4 cm Länge feststellen, daß der Schwingungsknoten nicht weniger als um 0,444 *l* und nicht mehr als um 0,538 *l* vom unteren Rohrende absteht. Aus Beobachtungen an einer Röhre von 50,4 cm Länge ergaben sich jene Grenzen zwischen 0,461 *l* und 0,487 *l*. Der Raum, innerhalb dessen hierbei der Knoten eingegrenzt war, betrug somit 0,026 *l* oder 1,3 cm. Bei einigen Einzelbeobachtungen ließen sich viel engere Grenzen finden; die engsten wurden innerhalb einer Röhre von 60,2 cm gefunden, sie lagen bei 0,472 *l* und 0,473 *l*, ihr Abstand betrug also nur ein Tausendstel der Rohrlänge.

Man könnte daher vermuten, daß die Höhe des Knotens **0,472 bis 0,473** *l* betrage. Das arithmetische Mittel aus 21 Beobachtungen an einer anderen Röhre gab den etwas größeren Wert 0,478 *l*, ob man aber überhaupt das arithmetische Mittel aus den Werten für die Grenzen,

innerhalb deren sich der Schwingungsknoten befindet, als denjenigen Wert ansehen darf, welcher der Knotenlage selbst entspricht, scheint durchaus fraglich, und um so bedenklicher, je größer die Differenz der Werte ist, aus denen das Mittel abgeleitet wurde. Es hat den Anschein, daß man, um die gleiche Verstärkung im Vibrieren des Sandes zu erhalten, die Membrane um eine geringere Strecke vom Knoten zu entfernen braucht, wenn man sie hierbei dem Heizroste nähert, als im entgegengesetzten Falle. Demgemäß aber müßte sich der Knoten niedriger befinden, als es das arithmetische Mittel angibt.

Ferner ist es unwahrscheinlich, daß es eine konstante Ebene bzw. Fläche innerhalb der Pfeife gibt, in welcher das Minimum der Bewegung herrscht, wahrscheinlicher hat man einen mehr oder weniger ausgedehnten Raum anzunehmen, in dem die gleiche minimale Bewegungsintensität herrscht. Endlich ist es auch möglich, daß dieser Raum keine ganz konstante Lage hat, sondern je nach den Versuchsbedingungen geringe Verschiebungen erfährt.

Für prismatische oder zylindrische, offene Lippenpfeifen soll der Knotenabstand vom Röhrenanfange 0,4 *l* betragen (vgl. S. 17): eine so tiefe Lage des Knotens konnte in der elektrischen Pfeife niemals gefunden werden, jener Abstand betrug vielmehr weit über 0,444 *l*. Andererseits wurde aber gefunden, daß sich der Knoten weiter nach oben verschiebt, wenn die mittlere Temperatur der unteren Rohrhälfte im Vergleiche zu derjenigen der oberen merklich gesteigert wird. Befand sich z. B. der Heizrost recht tief, etwa in einem Zehntel der Rohrlänge, so daß fast die ganze untere Rohrhälfte von der Luft erfüllt war, die sich an ihm bereits erhitzt und noch nicht in dem Maße abgekühlt hatte, wie die Luft der oberen Rohrhälfte, und war die Temperatur des Rostes durch stärkere Ströme bedeutend gesteigert worden, so erhielt man für die Abstände der Grenzen des den Knoten enthaltenden Raumes die Werte 0,472 und 0,519 *l*, was so viel bedeutet, als daß sich der Knoten in diesem Falle höher als sonst befunden haben mußte. Dies ist auch nicht unwahrscheinlich; denn ist die mittlere Temperatur der beiden Rohrhälften eine recht verschiedene, so ist auch die Geschwindigkeit, mit welcher sich die Verdichtungen und Verdünnungen innerhalb der beiden Hälften fortpflanzen, eine verschiedene, und muß die Stelle, an der sie zusammentreffen, nach derjenigen Rohrhälfte hin eine Verschiebung erleiden, in welcher die Geschwindigkeit, also die mittlere Temperatur, die geringere ist.

Nicht unmöglich wäre es demnach, den Schwingungsknoten ganz über die Rohrmitte hinaus in die obere Rohrhälfte hinein zu bringen, für gewöhnlich ist dies jedoch nicht der Fall, wenn schon der Knoten in der elektrischen Pfeife und ebenso in den Drahtnetzpfeifen und in der chemischen Harmonika sich in größerem Abstande vom Röhrenanfange befinden wird als in einer tönenden Röhre, deren beide Hälften die

gleiche mittlere Temperatur haben. Was die Lage der Knoten bei Obertönen der elektrischen Pfeife anlangt, so war es nicht ganz leicht, dieselbe zu bestimmen; es schienen sich hierbei zwar auch einige Anomalien zu zeigen, die aber noch nicht eingehend genug verfolgt worden sind.

Die Schwingungsbäuche befinden sich bei einer an beiden Enden offenen Röhre für den Grundton außerhalb der Rohrenden, für die Obertöne jedoch genau in der Mitte zwischen zwei benachbarten Schwingungsknoten. Eine Lagenbestimmung derselben für die elektrische Pfeife wurde nicht ausgeführt. Mittels der elastischen Metallscheibchen, welche zur Bestimmung der Knoten dienten, ließ sich dieselbe jedenfalls nicht ausführen; denn es ließ sich nicht genau angeben, bei welcher Lage des Scheibchens der auf ihm befindliche Sand die lebhafteste Bewegung zeigte. In merkliche Bewegung aber geriet der Sand noch dann, wenn sich, während die Röhre recht laut tönte, die metallene Membran in einem Abstande von etwa 20 cm vom oberen Rohrende in der Verlängerung der Rohrachse befand. Vermutlich handelte es sich hierbei um ein Mittönen der straff gespannten Membran. Auch an einer kleinen Gasflamme ließen sich deutliche Vibrationen noch in vielen Centimetern Entfernung vom Rohrende erkennen.

§ 9. Abstand zwischen Heizrost und Schwingungsknoten.

Bei einer offenen Lippenpfeife befindet sich der Anblasespalt am Boden der Pfeife, der Abstand zwischen diesem und dem Schwingungsknoten des Grundtons beträgt also, wenn man die Pfeifenlänge mit l bezeichnet, nahezu $\frac{l}{2}$. Er kann jedoch auch sehr klein gemacht werden, wie man aus folgendem Versuche ersieht. Eine Glasröhre von etwa 40 cm Länge war mit 40 um je einen Centimeter voneinander abstehenden Öffnungen versehen (vgl. Fig. 9 auf S. 51), welche durch luftdicht schließende Korke abgeschlossen waren. Blies man dann diese Öffnungen von außen her durch einen aus einem schmalen Spalt austretenden Luftstrom von geeigneter Stärke an, so erklangen je nach der Lage der angeblasenen Öffnung, der Stärke des Luftstromes und der Lage und Weite des Spaltes sehr verschiedene Töne. Den Grundton der Röhre gelang es jedoch stets zu erhalten, von $1\frac{1}{2}$ bis 2 cm Abstand vom Rohrende an bis zur Rohrmitte selbst, an der doch der Schwingungsknoten liegen müßte.

Bei der elektrischen Pfeife kann innerhalb so weiter Grenzen der Abstand zwischen dem die Anblaseöffnung vertretenden Heizroste und dem Schwingungsknoten nicht variiert werden. Rückt man den Heizrost in der Röhre hinauf, bis an die höchste Stelle, an der er noch tonerregend wirkt, so verschiebt sich auch der Schwingungsknoten in

dieser Richtung, und es gelingt nicht, den Abstand zwischen beiden kleiner als $^1/_2 l$ zu machen. Rückt man den Heizrost an das untere Rohrende, so nimmt der Abstand zwischen ihm und dem Schwingungsknoten zu, bleibt aber immer kleiner als $^1/_2 l$.

Nimmt der Heizrost seine günstigste Lage ein, so beträgt sein Abstand vom Schwingungsknoten $0{,}235\, l + \frac{\pi d}{16}$.

Wie diese Verhältnisse für die Obertöne der elektrischen Pfeife liegen, ist nicht genauer untersucht worden, namentlich weil sich hierfür ein stark abweichendes Resultat nicht vermuten ließ, die Bestimmung selbst aber recht schwierig wäre.

§ 10. Schwingungszahlen des Grundtons.

Je nach den Bedingungen, unter welchen man eine Röhre zum Tönen bringt, erhält man Töne, deren Höhe ein wenig verschieden ist. Der tiefste Ton erklingt, wenn man über den Pfeifenrand hinwegbläst; dieser Ton hat eine geringe Stärke und klingt geräuschartig. Der Ton, welchen die Röhre bei normaler Lage des Heizrostes gibt, ist fast um einen halben Ton höher als der durch Anblasen des Pfeifenrandes entstehende. Den Grund hierfür kann man offenbar darin suchen, daß die Temperatur der vibrierenden Luft im einen Falle die gewöhnliche, im anderen eine erhöhte ist.

Befindet sich der Heizrost nahe dem Schwingungsknoten oder nahe dem unteren Rohrende, so muß, damit ein kräftiger Ton auftritt, die Temperatur des Rostes gesteigert werden. Dementsprechend nimmt auch die Tonhöhe zu, wenn der Heizrost aus der normalen Lage verschoben wird. Nähert man ihn dem Rohrende sehr bedeutend, so kann die Tonerhöhung mehr als einen ganzen Ton betragen. Auch diese Tonerhöhung läßt sich noch durch die Temperatursteigerung der vibrierenden Luft erklären. Andererseits nähert sich aber bei starker Annäherung an das untere Rohrende der Heizrost auch jener Stelle, an welcher, genügende Rohrlänge vorausgesetzt, durch ihn ein Oberton erzeugt werden müßte. Dem Auftreten eines solchen geht aber, wie dies ja bei den Orgelpfeifen längst bekannt ist, eine Tonerhöhung voraus. Letztere kann man jedoch als eine bloß scheinbare Tonerhöhung ansehen, die eigentlich eine Änderung der Klangfarbe darstellt, indem außer dem Grundtone auch der erste Oberton schon vorhanden ist, von jenem aber noch übertönt wird. Das Vorhandensein des ersten Obertons im Klange dort, wo das Ohr sein Vorhandensein noch nicht erkennen kann, hat Raps[1]) in sehr anschaulicher Weise nach einer von

[1]) A. Raps, Über Luftschwingungen. Wied. Ann. 50, 193 bis 220, 1893.

Töpler und Boltzmann[1]) stammenden optischen Methode nachgewiesen. Es wurde ein Lichtstrahl durch die vibrierende Luft nahe dem festen Ende einer gedeckten Pfeife, ein anderer außerhalb der Pfeife durch die ruhende Luft gesandt, beide zur Interferenz gebracht und die auftretenden Lichtkurven photographiert. Es erschien hierbei, falls die Pfeife sehr schwach angeblasen wurde, eine reine Sinuslinie, entsprechend dem reinen Grundtone; sobald jedoch das Anblasen verstärkt wurde, veränderte sich bereits jene Lichtkurve und der erste Oberton machte sich bemerkbar, zunächst durch kleine Höcker, die aber bei weiterem Verstärken des Anblasestroms immer größer wurden. Hiernach läßt es sich verstehen, daß in unseren Versuchen bei sehr tiefer Stellung des Heizrostes die Tonerhöhung bis über die kleine Terz hinausging (vgl. S. 25, Tab. IV, 5).

Führt man in die elektrische Pfeife eine Metallscheibe in horizontaler Lage ein, so hat dies eine Tonvertiefung zur Folge; in ähnlicher Weise wirken auch andere in die vibrierende Luftsäule eingeführte Hindernisse, wie Drähte, dünne Röhren u. dgl. Eigentlich wird durch sie, da sie verzögernd auf die Luftbewegungen wirken, eine kleine Temperatursteigerung hervorgerufen, und man könnte daher vermuten, daß sie tonerhöhend wirken würden. In höherem Maße jedoch als die Temperatursteigerung wirkt ein anderer Umstand. Verschließt man nämlich das Ende einer offenen Orgelpfeife allmählich, so vertieft sich ihr Ton ebenfalls successive, bis endlich die der gedeckten Pfeife als Grundton zugehörige tiefere Oktave des ursprünglichen Pfeifentons auftritt. Das Hinabsenken einer festen Scheibe in die elektrische Pfeife bringt nun eine ähnliche Wirkung hervor, es verlangsamt die Schwingungen. Es ist deshalb auch erklärlich, weshalb die Scheibe eine um so bedeutendere Tonvertiefung hervorruft, je näher sie sich dem Schwingungsbauche befindet. In der Nähe des Schwingungsknotens bringt die Scheibe nur noch eine ganz geringe Tonvertiefung hervor, im Knoten selbst müßte sie die Tonhöhe ungeändert lassen, und unterhalb desselben, recht nahe dem Heizroste, wirkt die durch die Scheibe bewirkte Temperaturerhöhung so stark entgegen, daß die durch die Scheibe hervorgerufene Verzögerung der Vibrationen ganz kompensiert werden kann und sogar Tonerhöhung möglich ist.

Auch der Ton einer kleinen innerhalb der Röhre singenden Flamme (chemische Harmonika) ist höher als der durch einfaches Anblasen der Röhre entstehende Ton, jedoch ein wenig tiefer als der normale Grundton der elektrischen Pfeife, da die Temperatursteigerung, welche die kleine Flamme verursacht, jedenfalls viel geringer ist als die durch den glühenden Heizrost erzeugte; auch die geringere Dichte der Ver-

[1]) Töpler und Boltzmann, Über eine neue optische Methode, die Schwingungen tönender Luftsäulen zu analysieren. Pogg. Ann. **141**, 321, 1870.

brennungsgase erzeugt eine nur unbedeutende Tonerhöhung. Vergrößert man die singende Flamme, so hat dies eine allmähliche Tonerhöhung zur Folge.

Um ein übersichtliches Bild von den verschiedenen Änderungen der Tonhöhe durch die im Vorhergehenden angeführten Umstände zu erhalten, sind in der folgenden Tabelle die Schwingungszahlen einiger erhöhten bzw. vertieften Töne mit derjenigen zusammenstellt, welche dem normalen Tone der elektrischen Pfeife entspricht. Zur Bestimmung jener Schwingungszahlen wurde ein gewöhnliches Monochord benutzt, auf welchem eine Darmsaite ausgespannt war. Es wurde jedesmal die Länge L_1 der Saite gemessen, bei welcher sie mit einer Stimmgabel von $n_1 = 437$ Schwingungen übereinstimmte, und darauf die Schwingungszahlen der gehörten Töne nach der Relation $n_1 : n_2 = L_2 : L_1$ berechnet. Damit die Spannung der Darmseite bei der Verkürzung derselben nicht geändert werde, wurde die Verkürzung durch ein leichtes Andrücken einer stumpfen Messerklinge oder durch Festklemmen der Saite zwischen den Fingernägeln bewirkt. Bei so primitiven Hilfsmitteln kann man in den erhaltenen Zahlen natürlich nur rohe Annäherungen sehen, obgleich jede von ihnen das Mittel aus wenigstens fünf Beobachtungen darstellt. Die zu den Versuchen benutzte Klangröhre hatte eine Länge von 40,8 cm und einen Durchmesser von 3,5 cm.

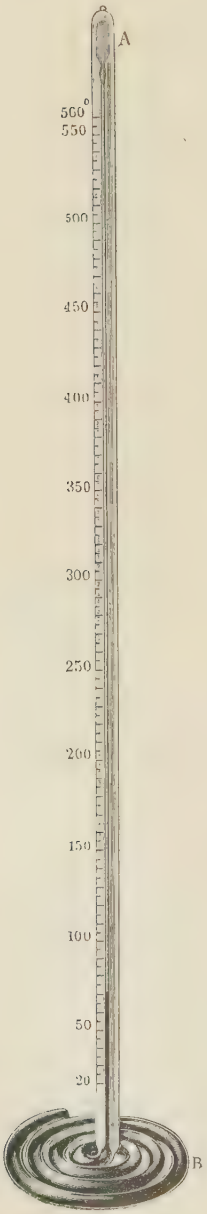
Tabelle IV.

Entstehungsbedingungen der Töne	Schwingungszahl
1. Durch Anblasen der Pfeife erhaltener Ton	388
2. Ton der elektrischen Pfeife bei normaler Rosthöhe ($h' = 8{,}1$ cm)	408
3. Dasselbe für $h = 13$ cm	417
4. Dasselbe für $h = 4{,}5$ cm	437
5. Dasselbe für $h = 1{,}6$ cm	476
6. Ton der elektrischen Pfeife ($h' = 8{,}1$ cm); Scheibe innerhalb der Röhre in größter zulässiger Höhe ($H = 33$ cm)	374
7. Wie 6, Scheibe noch oberhalb des Schwingungsknotens ($H = 22$ cm)	397
8. Wie 6, Scheibe jedoch in geringster Höhe ($H = 16$ cm)	410
9. Ton einer kleinen singenden Flamme	404

Vergleicht man die beiden ersten Zahlen unserer Tabelle miteinander, so findet man, da die Zunahme der Schwingungszahl wohl nur auf die durch Temperatursteigerung bewirkte Vergrößerung der Schallgeschwindigkeit bei nahezu konstant bleibender Wellenlänge zurückzuführen ist, unter obiger Voraussetzung einen angenäherten Wert für die Temperatursteigerung selbst. Bei normaler Lage des Heizrostes

findet sich hierfür etwa 30°, bei niedriger Rosthöhe (Tab. IV, 4), wo jedoch die Tonhöhenänderung noch keine scheinbare ist, etwa 73°. Mit Hilfe eines besonders hierzu hergestellten Thermometers (Fig. 4), das über dem Quecksilber bei *A* stark komprimierte Kohlensäure enthielt und daher Temperaturen bis über 500° zu messen gestattete und dessen Reservoir *B* eine spiralige Form hatte, so daß das Quecksilber einen Raum von fast zylindrischer Gestalt mit sehr geringer Höhe und nahezu dem Röhrenquerschnitte als Grundfläche einnahm, wurden Temperaturbestimmungen in verschiedenen Querschnitten der Röhre vorgenommen und den obigen naheliegende Werte gefunden, doch gelang es nicht, die strahlende Wirkung des Heizrostes so weit zu eliminieren, daß eine genaue Bestimmung der mittleren Temperatur der Luft innerhalb der Röhre möglich geworden wäre.

Fig. 4.



Vergleicht man die Schwingungszahlen untereinander, welche bei Anwesenheit der horizontalen Scheibe innerhalb der Röhre gefunden wurden, so sieht man, daß sich dieselben in dem Maße vergrößern, als sich die unterhalb der Scheibe befindliche Luftsäule verkürzt. Auf jeden Centimeter, um den sich die Luftsäule verkürzt, nimmt die Schwingungszahl um etwa 2,1 Einheiten zu. Berechnet man hiernach die Schwingungszahlen, welche für eine Scheibenhöhe von 13 cm und 4,5 cm gelten müßten, so erhält man fast genau dieselben Zahlen, welche beobachtet wurden, während der Heizrost (bei Abwesenheit der Scheibe) sich in diesen Stellungen befand (Tabelle IV, 3 u. 4). Für die niedrigste Lage des Heizrostes gilt diese Beziehung aber nicht, es ist die große Schwingungszahl 476 wohl durch Mitwirkung des ersten Obertons bewirkt worden, dessen Intensität noch zu gering war, um ihn gesondert wahrnehmen zu können.

Berechnet man die Schwingungszahl, welche der Lage der Scheibe am Schwingungsknoten entspricht, so erhält man 403 oder 404, d. h. nur etwas weniger als die Zahl, welche bei Abwesenheit der Scheibe und normaler Rosthöhe erhalten wird.

§ 11. Obertöne der elektrischen Pfeife.

Während es ein leichtes ist, Obertöne einer offenen Orgelpfeife zu erhalten, und auch in der chemischen Harmonika wenigstens die beiden ersten Obertöne durch entsprechendes Verschieben der Flamme und Verkleinern derselben selbst in recht kurzen Röhren leicht ansprechen, fällt es nicht leicht, Obertöne in der elektrischen Pfeife zu erhalten. In Röhren von $l < 40$ cm Länge kam bei meinen Versuchen kein solcher zustande. Röhren von $l = 40$ bis 60 cm gaben nur den ersten Oberton. Bei zunehmender Rohrlänge gelang es dann noch, den zweiten und dritten Oberton zu erhalten, über diesen hinauszugehen vermochte ich jedoch selbst in einer $1^1{}_2$ m langen Röhre nur durch gewisse Hilfsmittel, von denen im weiteren die Rede sein wird.

Der erste Oberton entstand beispielsweise in einer Röhre von 85 cm Länge, wenn sich der Heizrost in 8 cm bzw. 52 cm Abstand vom unteren Rohrende befand. Da eine Bestimmung der Stellen, an denen die Schwingungsknoten der Obertöne liegen, nicht ausgeführt worden war, so läßt sich aus diesen erforderlichen Heizrostlagen noch kein unmittelbarer Schluß ziehen, wenngleich dieselben auf eine abnorme Lage der Knoten hinzudeuten scheinen.

Den zweiten Oberton gelang es in einer 151 cm langen Röhre leicht und ohne weiteres zu erhalten, wenn sich der Heizrost 8 cm vom unteren Rohrende befand. Wenn übrigens soeben gesagt wurde, daß die Hervorrufung des zweiten Obertons leicht gelang, so bezieht sich dies auf den Fall, daß ein Heizrost aus starken, weniger als einen Millimeter voneinander abstehenden Drähten benutzt wurde. Heizroste mit weiter abstehenden Drähten erzeugten den zweiten Oberton entweder gar nicht oder nur bei gleichzeitiger Anwendung anderer Hilfsmittel, so z. B. falls sich an der Stelle des zweiten, nahe der Rohrmitte gelegenen Knotens eine fast den ganzen Röhrenquerschnitt einnehmende Pappscheibe befand oder falls eine kleine, nicht selbsttönende Flamme an geeignete Stelle der Röhre gebracht wurde.

Auch falls sich der Heizrost 8 cm vom oberen Rohrende befand, kam in der 151 cm langen Röhre der zweite Oberton zustande; jetzt aber mußte ein schwacher, vertikal abwärts gerichteter Luftstrom durch das obere Rohrende eindringen.

Der dritte Oberton entstand in der soeben erwähnten Klangröhre, falls sich der möglichst stark erhitzte Heizrost etwa $5^1/_2$ cm vom oberen oder unteren Rohrende entfernt befand; im ersteren Falle war das Ansprechen jedoch nur dadurch zu erreichen, daß ein abwärts gerichteter Luftstrom durch das obere Rohrende geleitet wurde.

Bedeutend höhere Obertöne konnten in derselben Klangröhre ($l = 151$ cm) noch dadurch erzielt werden, daß gegen den 2 bis 4 cm vom unteren Rohrende entfernten Heizrost ein schwacher, aufwärts ge-

richteter Luftstrom geblasen wurde. Auf diese Weise erhielt man successive alle Obertöne vom vierten bis zum elften mit der Schwingungszahl $12n$, wo n die Schwingungszahl des Grundtons ist.

Es war jedoch, um so hohe Obertöne zu erhalten, durchaus erforderlich, die Temperatur des Heizrostes nach Möglichkeit zu steigern; sie mochte vor dem Ansprechen der Töne über 1000° und während des Tönens 700 bis 800° betragen haben.

Aus dem Vorhergehenden ist ersichtlich, daß man Obertöne erhält sowohl während sich der Heizrost in der unteren, als auch während er sich in der oberen Rohrhälfte befindet, und auch der Grundton ist im letzteren Falle leicht zu erhalten, wenn man nur dafür sorgt, daß die aus der Klangröhre ins Freie tretenden Schallwellen kräftige Reflexion erfahren. Man erreicht dies, indem man einen mäßig starken Luftstrom gegen die Schallwellen richtet. Letzteres ist aber in jedem Falle erforderlich, wo sich kein Schwingungsknoten mehr oberhalb des Heizrostes befindet. Es ist dies eine Eigentümlichkeit der elektrischen Pfeife, denn in der chemischen Harmonika erhält man ohne weiteres einen Ton, auch wenn sich die Flamme oberhalb des Schwingungsknotens befindet, wie man dies z. B. aus den Versuchen von Bresina[1]) ersieht, und dasselbe gilt von einer Röhre, die man durch eine seitliche Öffnung von außen her anbläst.

§ 12. Durch Kühlgitter erzeugte Töne.

Rijke hat bei der Beschreibung seiner Versuche eine Beobachtung von Bosscha mitgeteilt, die im Folgenden besteht: „Beim Wiederholen einiger dieser Versuche hat Herr Bosscha bemerkt, daß zuweilen ein Ton entsteht in dem Moment, da man die Scheibe mittels einer Flamme zu erhitzen beginnt. Damit dieser Versuch gelinge, muß die Flamme in einem gewissen Abstande von dem Drahtnetz gehalten werden. Der Ton dauert gleichfalls nur einige Augenblicke. Er ist fast die höhere Oktave des Grundtons Indessen ist er nicht ganz unveränderlich und scheint von Zeit zu Zeit zu steigen." „Offenbar muß bei dem Versuche des Herrn Bosscha die Entstehung des Tons dem Erkalten zugeschrieben werden und folglich der Zusammenziehung, welche die erhitzten Gase beim Durchgange durch die Scheibe erleiden. Dieser Versuch kann als eine Umkehrung des vorhergehenden angesehen werden."

Meine Versuche bestätigten die obige Beobachtung, jedoch nur in dem Sinne, daß in der Tat durch das abkühlend wirkende Drahtgitter — daher die gewählte kurze Bezeichnung Kühlgitter — ein Ton hervorgerufen werden kann; was jedoch die Höhe jenes Tones anlangt, so ist es keineswegs die Oktave des Grundtons, sondern ein Ton, dessen Höhe

[1]) loc. cit., p. 10—12.

sich meistens zwischen der kleinen Terz und der Quinte des Grundtons befindet. Je höher man nämlich das Drahtnetz in der Röhre hinaufrückt, um so mehr steigert sich die Höhe jenes Tones. In welcher Weise die Lage des Drahtnetzes die Tonhöhe beeinflußt, erkennt man aus der folgenden Tabelle, in welcher h den Abstand des Drahtnetzes vom unteren Ende einer 45,7 cm langen Glasröhre, n die Schwingungszahl des entstehenden Tones bedeutet.

Tabelle V.

h	n
27 cm	482
30	541
35	567
40	581

Die Schwingungszahl des Grundtons der Röhre, falls sich das Drahtnetz in normaler Stellung befand und mittels Gasflamme erhitzt worden war, betrug 396 [1]), es lag somit der tiefste von obigen Tönen zwischen der kleinen und großen Terz des Grundtons, der höchste dagegen stellte nahezu die Quinte des Grundtons dar. — Hebt man das Klangrohr von der Flamme ab, während der Ton erklingt, so tritt jedesmal eine Vertiefung des letzteren ein, die um so bedeutender ist, je höher der zuvor erhaltene Ton war. Das hat offenbar darin seinen Grund, daß mit Entfernung der Flamme aus dem Klangrohr sich auch die Temperatur innerhalb des letzteren stark vermindert. Aus demselben Grunde muß, je näher sich das abkühlend wirkende Drahtnetz dem oberen Rohrende befindet, um so höher der auftretende Ton sein, da dann ein größerer Teil der Röhre von der Flamme eingenommen, die Temperatur der Gase im Innern der Röhre also höher ist, auch ist dann ein größerer Teil der Röhre von Gasen eingenommen, deren Dichte geringer ist als diejenige der Luft. Hierdurch erklären sich wohl die Resultate, welche in der Tabelle V enthalten sind.

Bei den obigen Versuchen befand sich das abkühlend wirkende Drahtnetz oberhalb der Rohrmitte, also in der oberen Rohrhälfte. Nach einem Referate über die Arbeit von Lord Rayleigh [2]) soll sich sogar das Netz, um durch seine abkühlende Wirkung einen Ton hervorzubringen, in der oberen Rohrhälfte befinden müssen. Leider ist aus dem Referate [3]) der Grund für jene Behauptung nicht zu erkennen, daß sie jedoch nicht

[1]) Bei Erregung mittels des elektrisch erhitzten Heizrostes gab die Röhre einen etwas tieferen Ton.

[2]) Nat. **18**, 319—321, 1878.

[3]) Beibl. **3**, 63, 1879.

zutrifft, kann man leicht nachweisen. Führt man ein Drahtnetz mit sehr engen Maschen in eine relativ weite Röhre (z. B. $d = 50$ mm) ein, so entsteht derselbe Ton, den wir jetzt der Kürze halber „Kühlton" nennen wollen, während sich das Drahtnetz in der unteren Rohrhälfte befindet. Der hierbei auftretende Ton ist sehr laut und klingt viel reiner als der Kühlton, den man erhält, während sich das Drahtnetz in der oberen Rohrhälfte befindet. Der Grund hierfür scheint mir darin zu liegen, daß im letzteren Falle die erhitzende Flamme sich fast ganz innerhalb der Klangröhre befindet und durch ihre Mitschwingungen die Vibration der Luft in der Röhre komplizierter macht.

Ist ein Drahtnetz mit sehr engen Lücken besonders geeignet, in der unteren Rohrhälfte den Kühlton zu erzeugen, so kann man mit ihm den Ton, bei welchem es erhitzend wirkt, überhaupt nicht oder nur mit Mühe hervorbringen.

Den Kühlton erhält man auch mit weitmaschigen Drahtnetzen, jedoch nur, wenn sich das Netz in der oberen Rohrhälfte und möglichst nahe dem oberen Rohrende befindet. Hier wird nämlich die ungenügende abkühlende Wirkung des Netzes durch diejenige der Rohrwandungen des unterhalb des Netzes befindlichen Röhrenteiles genügend verstärkt.

Weiter als bis zur Quinte des Grundtons gelingt es für gewöhnlich nicht, die Höhe des Kühltons zu steigern. Die Angabe von Rijke, daß der Kühlton fast die höhere Oktave des Grundtons darstelle, findet jedoch auch, freilich mit einer Einschränkung, ihre Bestätigung. Befindet sich nämlich ein stark abkühlend wirkendes Netz aus sehr dicken Drähten und mit sehr kleinen Öffnungen, wie beispielsweise das in Fig. 3 auf S. 9 abgebildete, um ungefähr 0,05 der Rohrlänge von jener Stelle entfernt, an welcher der Schwingungsknoten des Grundtons liegt, d. h. ist $h = 0{,}42\,l$, so erhält man den ersten Oberton, dessen Intervall in bezug auf den Grundton gleich 2,16 ist, der also die übermäßige Oktave des Grundtons darstellt. Ist das Heizgitter dem Schwingungsknoten näher, so ist der Ton etwas tiefer und stellt dann fast genau die Oktave des Grundtons dar.

Hebt man, während die übermäßige Oktave ertönt, das Klangrohr in die Höhe und entfernt es auf diese Weise von der erhitzenden Flamme, so erniedrigt sich der Kühlton um einen halben Ton und erlischt darauf.

Man hat es bei dem Kühlton also außer mit dem Grundton auch noch mit Nebentönen zu tun, und war der von Rijke und Bosscha beobachtete Kühlton nichts anderes als der erste Oberton.

Nicht schwer fällt es, selbst in Röhren von mittlerer Länge, auch den zweiten und in längeren Röhren den dritten und vierten Oberton zu erhalten. Als besonders geeignete Lage des Kühlgitters ergab sich hierbei eine solche, wo es nahezu in der Mitte zwischen dem untersten

Schwingungsknoten und dem darüberliegenden Schwingungsbauche sich befand, nämlich, wenn z. B. für den zweiten Oberton $h = 0{,}28\,l$ war.

Bei Anwendung von genügend langen Klangröhren wird es gewiß möglich sein, auch noch höhere Obertöne durch die abkühlende Wirkung der Drahtnetze zu erhalten.

Schließlich gelingt es, auch den nicht erhöhten Grundton zu erhalten, während sich das Kühlgitter in der Mitte zwischen dem Schwingungsknoten und dem oberen Röhrenende befindet [1]).

Fassen wir das Obige zusammen, so sehen wir, daß der Kühlton gegenüber dem Grundton der Röhre meist stark erhöht ist und dessen Terz bis Quinte darstellt, der erste Oberton ist schon weit weniger, fast bloß um einen halben Ton erhöht, der zweite Oberton stellt bereits die reine Quinte der Oktave dar. Die Tonerhöhungen kommen auf Rechnung der hohen Temperatur, welche die Luft und Verbrennungsgase unterhalb des Kühlgitters haben, sie sind im allgemeinen um so geringer, je tiefer, d. h. je näher dem unteren Rohrende sich das Kühlgitter befindet. — Die Aufrechterhaltung des nicht erhöhten Grundtons ist von Rayleigh (S. 6) erklärt worden.

§ 13. Klangfarbe der elektrischen Pfeife.

Aus dem Umstande, daß sich die Obertöne der elektrischen Pfeife, wenn das Klangrohr kurz ist, beispielsweise kürzer als 40 cm, bei einem Durchmesser von $3^1{}_2$ cm, überhaupt nicht hervorbringen lassen und auch in längeren Röhren nur bei besonderer Lage des Heizrostes und zumeist unter Zuhilfenahme gewisser begünstigender Umstände erhalten werden können, darf man den Schluß ziehen, daß dieses Instrument arm an Obertönen ist. Dasselbe Resultat leitet sich auch aus dem Umstande ab, daß eine Änderung des Pfeifenmaterials keine merkliche Klangänderung nach sich zieht (vgl. § 7). Endlich lehrt auch die unmittelbare Beobachtung, daß der Ton der elektrischen Pfeife bei normaler Lage des Heizrostes ein einfacher Ton ist, dessen harmonische Obertöne, wenn überhaupt schon vorhanden, sich dem Ohre nicht verraten. Er klingt hauchend, ähnlich dem Tone einer bauchigen, durch Anblasen zum Tönen gebrachten Flasche. Auch scheint er viel tiefer zu sein, als er es wirklich ist; vergleicht man ihn mit dem Tone einer angestrichenen Saite, so geschieht es leicht, daß man ihn um eine Oktave tiefer schätzt als den tatsächlich gleich hohen Saitenton. Die genannten Eigenschaften kommen nach Helmholtz [2]) den einfachen Klängen ohne Obertöne zu.

[1]) Die Arbeiten von P. Riess, über welche auf S. 2 und 3 ausführlich berichtet worden ist, habe ich erst kennen gelernt, nachdem diese Versuche bereits angestellt waren.

[2]) Helmholtz, Lehre von den Tonempfindungen, V. Ausgabe, S. 119 u. 120, 1896.

Mit Hilfe einer Reihe von konischen Resonatoren ließ sich ebenfalls das Gesagte bestätigen; es wurde nur der Ton desjenigen Resonators deutlich verstärkt, der dem Grundtone der elektrischen Pfeife entsprach.

Erst wenn die elektrische Pfeife sehr laut tönt, ändert sich ihr Klang ein wenig und es scheint dann, als höre man zwei sehr nahe beieinander liegende, d. h. in der Höhe nur wenig verschiedene Töne. Befindet sich endlich der Heizrost in größerer Entfernung von seinem normalen Orte, so tritt eine merkliche Klangänderung ein, die zunächst in einer Tonerhöhung besteht, indem man zuerst noch mit unbewaffnetem Ohr das Mitklingen des ersten Obertones nicht erkennt. Rückt man den Heizrost noch weiter, so erkennt man endlich im Klange das Vorhandensein jenes Obertones [1]); es kommt dann bei einer gewissen Lage des Heizrostes dazu, daß Grundton und Oberton wie im Kampfe miteinander erklingen, und zum Schlusse verschwindet der Grundton und es bleibt der Oberton allein übrig.

Durch bloße Steigerung der Temperatur des Heizrostes oder anderweitige Verstärkung des Konvektionsstromes läßt sich, bei normaler Lage des Heizrostes, kein Oberton hervorbringen; die scheinbare Klangänderung, welche hierbei auftritt, hat wahrscheinlich eine physiologische Ursache, dank welcher sehr laute Töne etwas dumpfer und vertieft klingen.

§ 14. Dauer der Tonentwickelung.

Schon Rijke hat die Beobachtung gemacht, daß seine Drahtnetzpfeifen nicht eher zu tönen anfingen, „als einige Augenblicke nach dem Moment, da die Lampe fortgezogen war“. Für gewöhnlich dauert es 2 bis 3 Sekunden bis nach der Entfernung der das Drahtgitter erhitzenden Flamme ein Ton auftritt. Rijke vermutet, daß dieses tonfreie Zeitintervall dadurch bedingt sei, daß „eine Luftsäule von weit weniger hoher Temperatur die durch die Flamme erhitzte Luft sowie die Verbrennungsprodukte“ ersetzen müsse. Diese Annahme dürfte in der Tat zutreffend sein, denn solange der Gasinhalt der Klangröhre eine Temperatur hat, welche nicht viel niedriger als diejenige des Drahtnetzes ist, kann letzteres nicht die periodischen Dichteänderungen der Gase hervorbringen. Noch ein anderer Umstand dürfte dazu beitragen, daß das Tönen der Rijkeschen Pfeifen so spät eintritt. Ist nämlich das Drahtnetz sehr stark erhitzt worden, so bringt es einen sehr heftigen Konvektionsstrom hervor, dessen Intensität dann allmählich nachläßt. Wie wir später sehen werden, ist aber eine zu turbulente Konvektionsströmung der Tonbildung hinderlich. Es muß sich also die Geschwindigkeit der Luftströmung ein wenig verringern, bevor die Röhre tönend werden kann.

[1]) Nur in längeren Röhren.

Bei der elektrischen Pfeife liegen die Verhältnisse etwas anders als bei den soeben erwähnten Drahtnetzpfeifen. Hier wird die Wärme den Drähten nicht durch eine zuvor aus der Röhre zu entfernende Flamme zugeführt, sondern die Wärmequelle befindet sich von vornherein außerhalb der Röhre. Da die Drähte des Heizrostes, wenn außerhalb der Röhre befindlich, fast sogleich, nachdem man den elektrischen Strom geschlossen, hellglühend werden, so müßte man ein beinahe momentanes Auftreten des Tones erwarten. Die Versuche zeigen jedoch, daß nach erfolgtem Stromschluß immer eine geraume Zeit — einige Sekunden bis zu einer halben Minute — verstreicht, bis der Ton erklingt. Der Grund hierfür liegt offenbar darin, daß der Drahtrost teils durch Strahlung, teils durch Konvektion — und namentlich durch letztere — einen sehr bedeutenden Teil der ihm durch den elektrischen Strom zugeführten Wärme verliert. Daher kommt es, daß bei Anwendung schwächerer Ströme 10 bis 30 Sekunden und mehr vergehen, bevor die Röhre zu tönen beginnt. Während dieses langen Zeitraumes erwärmen sich die Teile der Röhrenwandungen, welche dem Heizrost zunächst gelegen sind, und hierdurch wird der Wärmeverlust des Heizrostes durch Strahlung vermindert. Ist der Wärmeverlust so gering geworden, daß der Heizrost eine bestimmte Temperaturdifferenz gegenüber der ihn durchstreichenden Luft beibehalten kann, so beginnt die eigentliche Tonentwickelung. Die Dauer der letzteren muß sehr gering sein, denn verschließt man das obere Rohrende auf einige Zeit, welche dazu hinreicht, daß sich der Drahtrost und die ihm benachbarten Teile der Röhrenwandung genügend erhitzen, so beginnt das Tönen fast genau in dem Augenblicke, in welchem man das verschlossene Rohrende öffnet.

Je größer die Länge eines über den Heizrost gestülpten Klangrohres ist, um so heftiger ist im allgemeinen die Strömung der in ihm aufsteigenden Luft und um so stärker die Abkühlung, welche durch sie der Heizrost erfährt. Demgemäß beginnt unter sonst gleichen Verhältnissen eine lange Röhre später zu tönen als eine kurze.

§ 15. Dauer des Tönens.

Die Dauer des Tönens der Rijkeschen Drahtnetzpfeifen hängt davon ab, wie lange sich der erforderliche Temperaturüberschuß des Drahtgitters und der ihm benachbarten Teile der Röhrenwandung gegenüber dem Luftstrom und den entfernteren Teilen der Röhrenwandung erhält. Netze aus dünnem Metalldraht kühlen sich schnell ab, unterhalten daher das Tönen nur wenige Sekunden. Eine Scheibe aus durchlochtem Kupferblech, die sich wegen ihrer größeren Masse viel langsamer abkühlt, unterhält auch das Tönen viel länger.

Der durch den elektrischen Strom erhitzte Platindraht der elektrischen Pfeife ist imstande, das Tönen unbegrenzt lange aufrecht zu

erhalten, jedoch nur in dem Falle, daß die Klangröhre durch Leitung, Strahlung und Konvektion so viel Wärme verliert, als ihr durch den Heizrost und die durch letzteren erhitzte Luft zugeführt wird. Ist ein derartiges Gleichgewicht nicht vorhanden, nimmt beispielsweise die Temperatur der Röhre dauernd zu, so tritt schließlich ein Moment ein, wo das Tönen verstummt; es läßt sich dann von neuem erhalten, wenn man die Temperatur des Heizrostes steigert oder die Temperatur der Klangröhre verringert. Ihre Erklärung findet diese Erscheinung darin, daß die Luft innerhalb der Klangröhre seitens der Rohrwandungen Abkühlung erfahren muß.

Vergleicht man in bezug auf die Tondauer zwei Röhren miteinander, die sich nur durch ihre Länge unterscheiden, so findet man eine größere Tondauer für die Röhre von größerer Länge, was nach dem Vorhergehenden darauf zurückzuführen ist, daß die längere Röhre, dank ihrer größeren Oberfläche, sich langsamer erwärmt.

§ 16. Tonbegünstigende und tonverhindernde Umstände.

Je größer der Temperaturunterschied des Drahtrostes und der abkühlend wirkenden Teile der Rohrwandungen ist, um so leichter spricht die elektrische Pfeife an. Dementsprechend mußte, wie wir soeben sahen, eine Steigerung der Temperatur des Heizrostes bzw. eine Abkühlung der Röhrenwandungen tonbegünstigend wirken. Ist der Strom, welcher den Heizrost durchfließt, nicht ausreichend, um letzteren zur Glut zu bringen, so genügt es, die Röhre auf einige Sekunden zu verschließen. Auf diese Weise kann man auch mit Hilfe recht schwacher Ströme die Röhre zum zeitweiligen Tönen bringen. Andererseits ist dies einfache Hilfsmittel bei Vorhandensein eines genügend starken elektrischen Stromes geeignet, ein Tönen der Pfeife zu erzwingen, wenn es wegen ungeeigneter Dimensionen der Röhre, ungeeigneter Lage des Heizrostes oder sonstiger störender Umstände nicht ohne weiteres eintritt.

Bringt man eine Pappscheibe, welche fast den ganzen Röhrenquerschnitt einnimmt, oder ein Drahtnetz an eine geeignete Stelle der Röhre — nicht zu weit vom Schwingungsknoten entfernt und dem Heizroste nicht zu nahe — so wirken dieselben ebenfalls tonbegünstigend. Sie verhindern eine zu starke Abkühlung des Heizrostes, ohne die Luftbewegung wesentlich zu stören. Eine analoge Wirkung erhält man dadurch, daß wenige Centimeter über der oberen Rohrmündung eine Scheibe angebracht wird, deren Flächeninhalt denjenigen des Röhrenquerschnittes übertrifft: eine wegen zu geringer Erhitzung des Heizrostes nicht tönende Röhre wird dadurch zu dauerndem Tönen gebracht. Ohne nämlich die Schwingungsbewegung und den Konvektionsstrom zu hindern, verringert die an dieser Stelle befindliche Scheibe eine zu starke

Abkühlung des Heizrostes. Den Konvektionsstrom verstärkt auch eine nicht zu große Flamme, die sich einige Centimeter oberhalb des Heizrostes befindet. Sie muß sich jedenfalls unterhalb des Schwingungsknotens befinden; befindet sich die Flamme oberhalb des Knotens oder ist sie zu groß und bringt daher einen zu heftigen aufsteigenden Luftstrom hervor, so wirkt sie tonverhindernd.

Begünstigend wirkt auch ein schwacher Luftstrom, der oberhalb des Heizrostes in der Röhre aufsteigt und endlich ein solcher unterhalb des Rostes in die Röhre geblasener Strom von mäßiger Stärke. Die Wirkung des letzteren ist jedoch an gewisse Bedingungen geknüpft. Befindet sich der Heizrost in der unteren Rohrhälfte, so wirkt der Luftstrom tonbegünstigend, wenn er vertikal aufwärts bläst, ist der Rost jedoch in der oberen Rohrhälfte angebracht, oder befindet er sich in abnorm hoher Lage in der unteren Rohrhälfte, so muß der Luftstrom nach unten blasen. Im ersten Falle muß er den Konvektionsstrom beschleunigen, im letzteren verzögern. Das Gesagte gilt für den Fall, daß die Röhre den Grundton erschallen läßt. Obertöne können auch durch einen aufwärts blasenden Luftstrom verstärkt werden, während sich der Heizrost in der oberen Rohrhälfte befindet. Ist z. B. der Abstand des Heizrostes vom oberen Röhrenende ungefähr gleich drei Vierteln der Röhrenlänge und man läßt den Luftstrom von oben nach unten blasen, so erklingt der Grundton; läßt man den Luftstrom jedoch durch das untere Röhrenende eintreten, so erhält man den zweiten Oberton (falls die Länge der Röhre nicht zu gering ist). Für den Grundton und den zweiten Oberton fällt ja ein Schwingungsknoten zusammen, es ist also die Lage des Heizrostes bei $h = \frac{3}{4} l$ sowohl der Entstehung des Grundtones, als auch derjenigen des ersten Obertones günstig. Keiner von diesen beiden Tönen aber entsteht ohne weiteres; der Grundton — wie dies schon früher erwähnt wurde — deshalb nicht, weil für ihn oberhalb des Heizrostes kein Schwingungsknoten vorhanden ist und die über dem Roste befindliche Luft bloß aufsteigt, ohne genügende Verzögerung zu erfahren. Diese letztere wird durch den vertikal abwärts blasenden Luftstrom erzeugt. Der zweite Oberton jedoch entsteht meist nicht ohne weiteres, weil hierzu die Intensität des Konvektionsstromes zu gering ist; sie wird durch den vertikal aufwärts gerichteten Luftstrom gesteigert.

Nach dem Obigen ist es verständlich, weshalb man das Auftreten höherer Obertöne beobachtet, falls sich der Heizrost nahe dem unteren Rohrende befindet und der unterstützende Luftstrom aufwärts gerichtet ist oder falls der Rost dem oberen Rohrende nahe ist und der Luftstrom abwärts bläst.

Eine nicht ohne weiteres tönende Röhre kann man auch dadurch zum Ansprechen bringen, daß man sie in vertikaler Stellung schnell abwärts bewegt oder daß man eine horizontale Scheibe innerhalb der

Röhre schnell auf und ab bewegt, so daß sie hierbei um die Stelle, an welcher ein Knoten auftreten muß, nach beiden Seiten hin pendelt. Das Vorhandensein einer solchen Scheibe an der Stelle eines Knotens wirkt auch dann tonbegünstigend, wenn sie in Ruhe ist. Auf diese Weise kann man bisweilen das Auftreten eines bestimmten Obertones erzwingen, ebenso wie man eine Saite oder Klangplatte durch Festhalten gewisser Punkte dazu zwingen kann, einen bestimmten Oberton anzugeben.

Außer der Verstärkung der Luftbewegung wirkt natürlich auch die Resonanz tonbegünstigend. Ist die Temperatur des Heizrostes nicht ganz hinreichend, um Tönen hervorzurufen, so läßt sich letzteres dadurch auslösen, daß man Schwingungen von entsprechender Periode in der Nähe der Pfeife erzeugt. Falls man z. B. den Ton der Röhre singt, pfeift, von einer chemischen Harmonika angeben läßt usw., so beginnt die Röhre zu tönen. Bisweilen nimmt die erhitzte Luft innerhalb der elektrischen Pfeife einen so labilen Zustand an, wie er an den sensitiven Flammen mit dem Auge wahrgenommen werden kann. Ich erhielt diesen Zustand, wenn sich innerhalb der Klangröhre, nahe dem Schwingungsknoten des Grundtones, eine ebene Scheibe befand, die fast den ganzen Röhrenquerschnitt einnahm und hierdurch der Luftzirkulation hindernd entgegenwirkte, während sich der von einem starken elektrischen Strome durchflossene Heizrost in heller Glut befand. Die Röhre tönte hierbei nicht, erregte man aber, selbst in Entfernung vieler Meter von der Pfeife, ein entsprechendes Geräusch, so begann dieselbe sofort auf kurze Zeit zu tönen. Während nun aber die sensitiven Flammen meist nur auf hohe Töne, ganz besonders aber auf die höchsten Töne, wie sie in zischenden Lauten enthalten sind, kräftig reagieren, so zeigte sich die Luftsäule der elektrischen Pfeife gegen diese ganz unempfindlich und wurde am besten durch tiefere Töne und dumpfe Geräusche zum Ertönen gebracht. Sie reagierte wiederholt auf das äußerst schwache Geräusch, das von vorüberrollenden Wagen auf der recht entfernten Straße herstammen mochte. — Daß auch ein unentzündetes Gas, das unter entsprechendem Drucke aus einer Öffnung tritt, gegen Schallschwingungen in hohem Grade empfindlich ist, hat bereits Tyndall[1]) beobachtet.

Auch unregelmäßige Vibrationen können das Tönen der elektrischen Pfeife auslösen, wenn sie nahezu befähigt ist, selbständig zu tönen. So beobachtete ich wiederholt, daß die Erschütterungen, welche durch Hin- und Herrücken eines Stuhles auf dem Fußboden entstanden, ein momentanes Ansprechen der Röhre zur Folge hatten. Ebenso wirkte bisweilen ein schwaches Klopfen an der Röhrenwandung.

Daß ein in die elektrische Pfeife gegen den glühenden Rost blasender Luftstrom bald tonbegünstigend, bald tonverhindernd wirkt, scheint

[1]) J. Tyndall, Der Schall. Übers. von H. v. Helmholtz und G. Wiedemann, S. 289. Braunschweig 1860.

vornehmlich seinen Grund darin zu haben, daß der Konvektionsstrom in der Pfeife eine gewisse Geschwindigkeit haben muß, um das Tönen zu begünstigen. Nun verändert aber ein solcher Luftstrom die Geschwindigkeit des ersteren, vergrößert oder verringert sie. Vermutlich wird er am günstigsten wirken, wenn seine Richtung und Geschwindigkeit derartige sind, daß die Resultante aus Luftstrom- und Konvektionsstromgeschwindigkeit gleich wird der Geschwindigkeit des Konvektionsstromes bei normalem Tönen der Pfeife. Um diese Vermutung zu prüfen, wurde mit Hilfe eines kleinen Anemometers die Geschwindigkeit v_1 des Konvektionstromes, sowie diejenige v_2 des künstlichen Luftstromes bestimmt, die gerade geeignet war, das Tönen der Pfeife aufrecht zu erhalten, während der Pfeifenachse alle möglichen Richtungen γ gegen die Vertikale gegeben wurden. Benutzt wurde eine etwa 50 cm lange Röhre, der Heizrost befand sich in 10 cm Abstand von demjenigen Rohrende, von welchem her der künstliche Luftstrom blies. Es ergab sich dabei in der Tat das erwartete Resultat, indem die Summe beider Geschwindigkeiten v_1 und v_2 nahezu konstant blieb. Für den Fall, daß sich die Pfeife in vertikaler, bzw. horizontaler Lage befand, wurden folgende Zahlen gefunden:

Tabelle VI.

γ	v_1	v_2	$v_1 + v_2$
0^0	38 cm/sec	0	38
90^0	0	36 cm/sec	36
180^0	— 30 cm/sec [1])	70 cm/sec	40

Die angeführten Zahlen sind die am besten der Konstanz von $(v_1 + v_2)$ genügenden, aber auch die übrigen deuten wenigstens darauf hin, daß v_2 um so größer sein muß, je mehr die Geschwindigkeit des Konvektionsstromes durch ungeeignete Stellung des Rohres oder zu geringe Temperatur des Rostes verringert ist. Es kommt übrigens nicht allein auf die Geschwindigkeit des Luftstromes an, sondern er muß auch bisweilen an bestimmter Stelle des Rohres auftreten, so z. B. bei sehr hoher Lage des in der unteren Rohrhälfte befindlichen Heizrostes statt längs der Rohrachse längs der Rohrwandung verlaufen.

Tonverhindernd wirken zunächst alle die Umstände, welche den Konvektionsstrom hemmen oder zu sehr beschleunigen. Daher verstummt die elektrische Pfeife, auch wenn sie vorher noch so laut tönte, in dem Moment, wo man die obere oder untere Rohröffnung verschließt. Bei

[1]) Die Geschwindigkeit des Konvektionsstromes ist hier negativ genommen, weil derjenigen des Luftstromes entgegengesetzt.

teilweisem Verschließen des Rohres kann jedoch das Tönen fortdauern. Wird z. B. am oberen Rohrende eine feste Platte angebracht, deren Durchmesser nur um 1 bis 2 mm kleiner als derjenige der Röhre ist, so verstummt das Tönen nicht immer. Legt man auf die Pfeifenmündung eine Pappscheibe mit gezahntem Rande, die für den Luftzug ganz schmale nicht zusammenhängende Lücken freiläßt, so verhindert auch dies ein Weitertönen der Pfeife nicht. Verschließt man dagegen das obere Pfeifenende durch ein Diaphragma, welches in der Mitte eine kreisförmige Öffnung hat, so muß der Durchmesser dieser Öffnung verhältnismäßig groß sein, damit das Tönen nicht verhindert wird. Für eine zylindrische Röhre von 36 mm innerem Durchmesser mußte beispielsweise der Durchmesser jener Öffnung größer als 10 mm sein. Berücksichtigt man den Umstand, daß das teilweise Verschließen der oberen Rohröffnung eine Störung in der symmetrischen Anordnung der schwingenden Luftsäule veranlaßt, so kann man eine Analogie mit der Luftbewegung in Lippenpfeifen vermuten, und in der Tat steht die obige Erscheinung in gutem Einklange mit der Beobachtung von Friedrich[1]), nach welcher in Lippenpfeifen die Luftströmung an der vorderen, die Lippe enthaltenden Pfeifenwandung aufsteigt, außerhalb der Pfeife, in einiger Entfernung von ihrer Mündung, umbiegt, sich in eine horizontale Strömung verwandelt und dann an der entgegengesetzten Pfeifenwand wieder abwärts ins Innere der Pfeife bewegt. Jene Strömung müßte daher, wenn nämlich das Diaphragma eine an der Pfeifenachse gelegene Öffnung hat, an einem Rande der Öffnung aufsteigen, oberhalb des Diaphragmas horizontal werden und am entgegengesetzten Rande der Öffnung wieder ins Pfeifeninnere zurückkehren, was nur dann möglich ist, falls der Durchmesser der Öffnung nicht zu klein ist. Ist dagegen die Röhre durch eine feste Scheibe bis auf einen ganz schmalen Streifen am Rande geschlossen, so kann die Luftströmung immerhin am Pfeifenrande austreten, um die Scheibe umbiegen und wieder in die Pfeife zurückgelangen.

Nach Brockmann[2]) erfolgt die Bewegung der Luftteilchen am oberen Pfeifenende nahe der Rohrachse in vertikaler, an den Rohrwandungen in horizontaler Richtung; diese Angabe widerspricht derjenigen von Friedrich und findet auch an unserer Beobachtung keine Stütze.

Führt man in die elektrische Pfeife eine beiderseits offene oder auch geschlossene Glasröhre ein, so kann dieselbe, falls ihr Durchmesser gering ist (bis zu 8 mm bei 40 mm Durchmesser der Pfeife), bis in die Höhe des Heizrostes hinabreichen, ohne daß das Tönen verstummt. Ist

[1]) W. Friedrich, Über Entstehung des Tones in Labialpfeifen. (Rostocker Dissert.) Drud. Ann. **7**, 97 bis 115, 1902.

[2]) W. Brockmann, Beobachtungen an Orgelpfeifen. Inaug.-Dissert. Berlin 1889.

der Durchmesser der Senkröhre größer, so muß sie offen bleiben, anderenfalls erlischt der Ton; es bildet sich also in weiteren Senkröhren ebenfalls eine Schwingungsbewegung aus, welche nicht gehemmt werden darf.

Während ein schwaches Anblasen auf das Tönen der elektrischen Pfeife begünstigend einwirkt, hat ein zu starkes Anblasen die entgegengesetzte Wirkung zur Folge. Ebenso wirkt es ungünstig, wenn man in die Pfeife während des Tönens unterhalb des Heizrostes ein Gas hineinleitet, welches spezifisch bedeutend leichter ist als Luft. Der Grund hierfür liegt vermutlich darin, daß das dank seinem geringen spezifischen Gewichte schnell aufsteigende Gas, bevor es den Heizrost passiert hat und zum Schwingen gebracht ist, den abwärts gerichteten Luftströmungen entgegenwirkt, ebenso wie ein zu starker Luftstrom. In derselben Weise muß auch ein Strom erhitzter Luft wirken, den man in die Röhre hineinsendet. In der Tat verstummt die Pfeife, wenn man eine kleine Flamme an die untere Rohröffnung bringt oder eine größere Flamme von oben her in die Röhre senkt, so daß sie in der Nähe des Schwingungsbauches bleibt. In beiden Fällen wirkt außer dem genannten Umstande auch noch der, daß die Flamme eine bedeutende Dichteänderung der Luft erzeugt, während doch die Gasdichte an den Schwingungsbäuchen konstant bleiben muß.

Ein Erlöschen des Tönens wurde bisweilen auch beobachtet, wenn sich der Körper des Beobachters sehr stark der Pfeifenwandung näherte wie z. B. beim Ermitteln der Knotenlage durch direktes Abhorchen der Röhre (vgl. S. 18). Es könnte vermutet werden, daß die starke Annäherung an die Pfeife das Eintreten wärmerer und leichterer Luft in die Pfeife und hierdurch das Verstummen des Tönens bewirkt habe, daß aber dies nicht der einzige Grund ist, ging daraus hervor, daß die Erscheinung sich auch dann wiederholte, wenn durch Dazwischenschaltung eines Pappschirms die untere Pfeifenmündung geschützt war.

Auch der durch den glühenden Drahtrost selbst hervorgerufene Konvektionsstrom kann unter Umständen dem Fortbestehen des Tönens hinderlich sein. Liegen die Windungen des Heizrostes sehr nahe beieinander, und läßt man dieselben sehr intensiv glühen, so wird die aufsteigende Luftströmung so heftig, daß ein Tönen entweder gar nicht eintritt oder sehr bald aufhört. Schwächt man jetzt den elektrischen Strom, so tritt lautes, anhaltendes Tönen ein.

Diese Erscheinung erklärt es wohl auch, weshalb bei den Rijkeschen Drahtnetzpfeifen das Tönen immer erst einige Sekunden nach dem Momente einsetzt, wo man die erhitzende Flamme entfernt hat. Daß eine zu intensive Luftströmung der Ausbildung bzw. Aufrechterhaltung von Schallschwingungen hinderlich ist, beobachtet man bekanntlich auch an Orgelpfeifen. Ist das Gebläse zu intensiv, so spricht

eine solche Pfeife überhaupt gar nicht an und man hört bloß das laute Geräusch des Anblasestroms.

Überdeckt man den Heizrost der elektrischen Pfeife mit einem Drahtnetz, so wird letzteres ebenfalls glühend und beeinflußt das Tönen der Pfeife nicht. Breitet man jedoch auf dem Heizroste ein Scheibchen aus dem Aschengeflecht aus, wie es zur Herstellung der sogenannten Auerstrümpfe der Gasglühlichtbrenner dient, so läßt sich die Pfeife nicht zum Tönen bringen. Es ist also wohl die weiche, unelastische Beschaffenheit des Geflechts die Ursache, weshalb die Luft beim Durchströmen desselben nicht zum Tönen kommt, oder aber die bereits entstandenen Vibrationen wieder ersterben. Befindet sich das Geflecht nur wenige Millimeter vom Heizroste entfernt, so wirkt es nicht mehr tonverhindernd.

Fig. 5.

Wie man das Tönen durch Resonanz begünstigen bzw. anregen kann, so kann man es auch durch Interferenz stören oder ganz verhindern. Hält man über dem oberen Ende der tönenden elektrischen Pfeife einen konischen Resonator, der auf den Ton der Pfeife gestimmt ist, mit der weiten Öffnung nach unten gekehrt, so erlischt der Pfeifenton momentan. Von der analogen Wirkung, welche ein Verschließen der oberen Rohröffnung hervorbringt, ist diese insofern völlig verschieden, als sich die Drähte des Heizrostes nicht stärker erhitzen, die Luftvibrationen im Klangrohre also nicht wie dort aufgehoben werden. Nähert man den in vertikaler Stellung gehaltenen Resonator der oberen Pfeifenöffnung von der Seite her, so fühlt man zunächst ein Erzittern seiner Wandungen, was auf ein kräftiges Mitschwingen der in ihm enthaltenen Luft hinweist.

Sobald die Resonatoröffnung diejenige der Pfeife zu überdecken beginnt (vgl Fig. 5), erhöht sich der Pfeifenton und erlischt derselbe, sobald ein nicht zu geringer Teil der Pfeifenöffnung überdeckt ist. — Hält man den Resonator ganz über der Pfeifenöffnung und hebt ihn dabei in die Höhe, so beginnt die Pfeife erst zu tönen, wenn die beiden Mündungen von Resonator und Pfeife etwa 4 cm voneinander abstehen. (Die Länge der Pfeife betrug 40,8 cm, die Länge der Resonatorröhre 38,5 cm.)

Was die Ursache der Erscheinung anlangt, so beruht sie auf Interferenz der in der Pfeife und im Resonator entstehenden Schallwellen. Im Resonator entstehen Schwingungen von derselben Periode,

wie diejenigen der Pfeife, jedoch von entgegengesetzter Phase. Kehrt man daher die Mündungen von Pfeife und Resonater einander zu, so trifft stets eine verdichtende Welle der Pfeife mit einer verdünnenden, aus dem Resonator austretenden zusammen und umgekehrt, ein Tönen kann daher nicht zustande kommen. Verschließt man jedoch die obere kleine Öffnung des Resonators, so ändert sich dessen Schwingungsperiode und findet keine Unterdrückung des Pfeifentones mehr statt, weil die Phasen zwar verschieden, aber nicht direkt entgegengesetzt sind.

Senkt man die Resonatorröhre, ohne ihr oberes Ende zu verschließen, über die Pfeife, so erklingt ein Ton erst, wenn sich das Pfeifenende ungefähr in der Mitte der Resonatorröhre befindet. Der Ton ist jetzt etwas tiefer als der Grundton der Pfeife und wird um so tiefer, je tiefer man die Resonatorröhre senkt. Die Tonvertiefung konnte bis zur Quinte gebracht werden.

§ 17. Luftbewegungen in der elektrischen Pfeife.

Die Bewegungen, welche die Luft im Innern der Pfeife während des Tönens ausführt, sind recht kompliziert. Zur Beobachtung der langsameren, mit den Augen direkt verfolgbaren Bewegungen wurden kleine, leichte Papierblättchen und Ascheteilchen benutzt, zur Beobachtung der schnelleren, innerhalb einer Schwingungsperiode erfolgenden — nichttönende Flammen, die stroboskopisch untersucht wurden.

Bringt man ein kleines, in der Mitte eingebogenes Stückchen Seidenpapier oder Rauschgoldblättchen ans obere Pfeifenende, so erhält sich dasselbe in schwebender Lage und führt dabei, an die Röhrenwandung geschmiegt, eine kreisende Bewegung aus, die unbegrenzt lange andauern kann.

Läßt man auf dem Heizroste kleine Wattebäuschchen verglimmen, so sieht man, wie das entstehende Aschekügelchen, nachdem es zu glühen aufgehört hat, sich auf dem Heizroste noch einige Male mit großer Geschwindigkeit im Kreise um die Rohrachse bewegt. Hat darauf die Größe, somit also auch das Gewicht des Aschekügelchens genügend abgenommen, so wird es meist von dem aufsteigenden Luftstrome gehoben und - nachdem es einigemal zurückgefallen war — schließlich in die obere Rohrhälfte hinein- oder ganz aus dem Rohre hinausgestoßen.

Läßt man feingeschnittenen Zigarettentabak auf dem Heizroste verglimmen, so zerfällt er in ganz feine Ascheteilchen, von denen diejenigen, welche sich nahe der Rohrwand befinden, längere Zeit auf und ab pendeln, wobei die größeren 1 bis 2 cm hoch, die kleineren 10 cm und höher steigen, um dann immer wieder zurückzufallen. Die näher zur Rohrachse befindlichen Partikelchen bewegen sich teils ganz regellos, wie Schneeflocken bei heftigem Winde, teils in aufwärtssteigenden Schraubenlinien.

Flammen, die man in die tönende Pfeife einführt, nehmen — falls sie selbsttönend werden — ein sehr kompliziertes und verschiedenartiges Aussehen an. Ihr Rand bedeckt sich mit zahlreichen Spitzen und Fransen, die bei Beobachtung in einem rotierenden Spiegel sich in Flammenzungen von verschiedener Länge und Breite auflösen und darauf hindeuten, daß der Klang zahlreiche Obertöne enthält. Es ist nicht mehr der Klang der elektrischen Pfeife, wie man dies schon unmittelbar mit dem Ohre erkennt, und das Flammenbild stellt daher nicht den Schwingungsvorgang der Luft in der Pfeife dar, sondern die selbständigen Schwingungen der tönenden Flamme. Kommt die Flamme nicht zum selbständigen Tönen, was man daran erkennt, daß sie den Klang der elektrischen Pfeife nicht verändert, so kann sie sehr wohl über die Bewegungen der Luft innerhalb der tönenden Pfeife Aufschluß geben. So erkennt man z. B. mit ihrer Hilfe, daß sich unterhalb des Heizrostes eine aufsteigende Luftströmung längs den Rohrwandungen, eine absteigende längs der Rohrachse ausbildet. Wurde die helle Flamme eines Bunsenbrenners von etwa 1 cm Brenneröffnung soweit verkleinert, daß ihre Höhe etwa 1 cm betrug und nun unter den Heizrost gebracht, so sah man, wie sie sich duckte und fast vollständig in das Innere der Brennerröhre zurückzog, gleich als ob eine vertikal abwärts gerichtete Luftströmung auf sie einwirkte, nahe der Röhrenwand dagegen streckte sie sich ein wenig.

Befindet sich oberhalb des Heizrostes eine lange und sehr schmale Flamme, so teilt sich dieselbe in eine sehr große Zahl paralleler, horizontaler Schichten, die wenige Millimeter voneinander abstehen. Eine solche sehr schmale und lange Flamme wurde dadurch erhalten, daß ein mit Seide doppelt übersponnener Kupferdraht in die Röhre gehängt wurde, so daß er mit der Röhrenachse zusammenfiel und bis nahe an den Heizrost hinabreichte. Durch die Strahlung des glühenden Rostes entzündeten sich die Seidenfäden und der Kupferdraht bedeckte sich mit einer etwa 10 cm langen, wenige Millimeter breiten Flamme, welche in die erwähnten parallelen Schichten zerfiel. Letztere erinnerten in ihrem Aussehen an die bekannten Rippungen in den Kundtschen Staubfiguren, und dürften sie auch vielleicht ihre Entstehungsursache mit jenen gemein haben. Nach den Untersuchungen von W. König[1]) kann man jene Rippungen auf die Wirkung hydrodynamischer Kräfte zurückführen; kleine, leichte in einer tönenden Röhre befindliche Körper suchen sich gegenseitig abzustoßen, falls ihre Verbindungsgerade der Rohrachse parallel ist, während sie einander anziehen, wenn jene Gerade zur Schwingungsrichtung senkrecht steht. Die Rippungen in den Staubfiguren können sich nur an der nach unten gekehrten Rohrwandung ausbilden, während die überaus leichten Kohleteilchen in einer

[1]) W. König, Hydrodynamisch-akustische Untersuchungen. Wied. Ann. **42**, 353 bis 370, 549 bis 563; **43**, 43 bis 60, 1891.

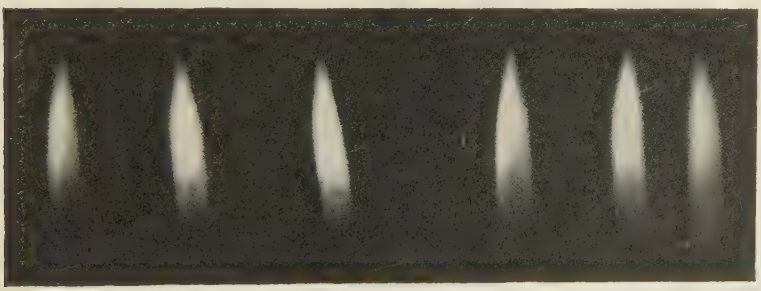
Flamme das Auftreten solcher Rippen an der vertikalen Rohrachse möglich werden lassen. Die zur Rippenbildung erforderlichen Kräfte treten namentlich in der Nähe der Schwingungsbäuche in Wirkung und es wäre demnach anzunehmen, daß die erwähnte sehr schmale Flamme dem Tone der Pfeife recht hohe Obertöne beigemischt habe, was sich auch aus dem Klange des Pfeifentones vermuten ließ.

Um vollkommen dessen sicher zu sein, daß die zur Untersuchung der Luftbewegungen innerhalb der elektrischen Pfeife dienende Flamme keine selbständigen Schwingungen ausführe, wurde folgender Umstand

Fig. 6.

benutzt. Wie die Beobachtungen an der chemischen Harmonika zeigen, gelingt es mit einer kurzen, breiten Flamme von gewissen Dimensionen nicht eine Röhre zum Tönen zu bringen, es muß also eine solche Flamme wenig oder gar nicht befähigt sein diejenigen Bewegungen selbständig auszuführen, die von einer tönenden Flamme in der chemischen Harmo-

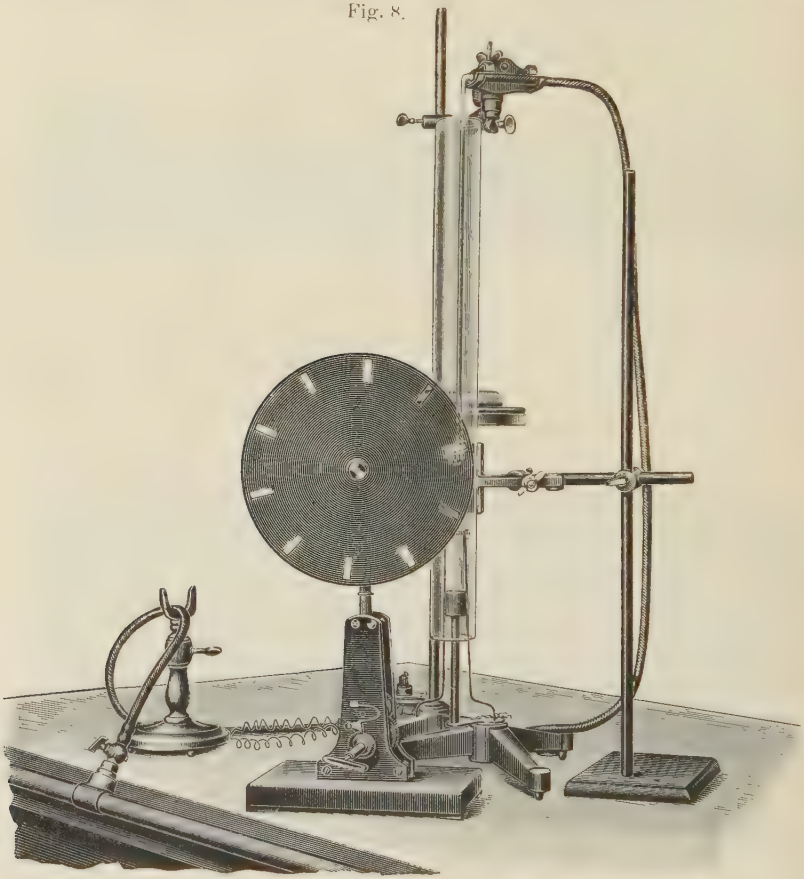
Fig. 7.



nika vollführt werden. Führt man daher eine solche Flamme (Kerzenflammen, die derselben Bedingung des Nichttönens genügen, konnten wegen der Wirkung des Heizrostes nicht angewandt werden) in das Klangrohr der elektrischen Peife ein und bringt sie dem Schwingungsknoten nahe, wo sie das Tönen am wenigsten beeinträchtigt, so kann man annehmen, daß sie fast nur diejenigen Bewegungen zeigen wird, welche die Luft innerhalb der tönenden Röhre auch bei Abwesenheit der Flamme ausführt. Mit dem bloßen Auge betrachtet, erscheint sie in völliger Ruhe und neigt sich nur dann und wann zur Seite. Die Fig. 6 enthält eine Reihe von Momentaufnahmen der Flamme auf ein und derselben Platte bei geringer Flammengröße. Die Aufnahmen zeigen ungefähr dasselbe,

was man auch unmittelbar sieht. Die Fig. 7 enthält einige Momentaufnahmen einer etwa 3 cm hohen, am Grunde mehr als 4 mm breiten Flamme, welche sich in einer solchen Stellung befand, daß ihre Basis mit der Stelle zusammenfiel, an welcher sich der Schwingungsknoten der Pfeife (welche den Grundton angab) befinden mußte. Bei dieser Lage der Flamme gelingt es, ihr eine Länge von mehreren Centimetern

Fig. 8.



zu geben, ohne daß sie das Tönen der Pfeife verhindert. Man erkennt auch an diesen Bildern keine Bewegungen der Flamme, und doch betrug die Expositionsdauer, da ein sehr guter Momentverschluß benutzt wurde, nur einige Hundertstel Sekunden.

Um zu erfahren, ob nicht vielleicht Bewegungen, welche vom Auge nicht direkt wahrgenommen werden können, von der Flamme ausgeführt werden, benutzte ich einen Töplerschen Vibroskopen, wie ihn die Fig. 8

zeigt; derselbe besteht aus einer durch ein Uhrwerk in Rotation versetzten Pappscheibe mit rechteckigen Spalten. Die Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe kann durch geringeres oder stärkeres Anziehen einer kleinen, als Bremse dienenden Schraube reguliert werden, eventuell auch dadurch, daß man das Uhrwerk während des Versuchs immer nur um einen Teil aufzieht, der sogleich wieder abläuft, so daß ein schnelleres Aufziehen auch eine schnellere Rotation der Scheibe zur Folge hat. Bläst man zugleich durch ein Röhrchen gegen die rotierende Scheibe, so entsteht ein Ton, dessen Höhe von der Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe abhängt. Ist dieser Ton ebenso hoch wie derjenige der elektrischen Pfeife, so heißt dies, daß sich die Spalte der als Sirene wirkenden Scheibe innerhalb einer Schwingungsperiode des Pfeifentons folgen. Blickt man jetzt durch die Spalte nach der Flamme, so zeigt dieselbe eine ganz veränderte Gestalt, die ungefähr an die Form eines Korkenziehers erinnert. Je nachdem die Flamme kürzer oder länger ist, weist sie eine größere oder geringere Anzahl von vollen Schraubenwindungen auf. Bei einer 4 cm langen Flamme waren es 3 bis 4 volle Windungen. Stimmt die Rotationsdauer der Scheibe nicht genau mit der Schwingungsperiode des Pfeifentons überein, so sieht man die Flamme sich schraubenförmig bald rechts, bald links herum winden. Wie die Fig. 6 und 7 zeigen, erkennt man von diesen eigentümlichen durch die Flamme angezeigten Bewegungen der Luft in der tönenden Pfeife gar keine Spur, wenn man gewöhnliche Momentaufnahmen der Flamme macht. Es wurden daher Aufnahmen unter gleichzeitiger Anwendung der vibroskopischen Scheibe und eines Momentverschlusses der Kamera gemacht. Die Fig. 8 zeigt die elektrische Pfeife, die zu photographierende Flamme und die vibroskopische Scheibe. Durch letztere hindurch wurde auf die Flamme eingestellt und gleichzeitig nach derselben visiert. Trat dann bei entsprechender Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe die charakteristische Schraubenform der Flamme auf, so wurde durch Druck auf einen Gummiball der Momentverschluß des Objektivs in Tätigkeit gesetzt. Die auf diese Weise erhaltenen Bilder der Flamme zeigten nun allerdings die eigentümlichen Schraubenwindungen derselben, doch waren sie so schwach, daß von einer Wiedergabe derselben an dieser Stelle abgesehen worden ist. Die geringe Expositionsdauer dürfte nicht allein daran schuld sein, daß die Bilder zu schwach ausgefallen sind, sondern wahrscheinlich waren auch die von der gelblichen Flamme ausgesandten Strahlen zu unwirksam. Unter Anwendung einer Acetylenflamme und eines lichtstärkeren Objektivs sollen die Aufnahmen wiederholt und an anderem Orte reproduziert werden.

Aus den erwähnten Schraubenformen der Flamme muß man schließen, daß die während einer Schwingungsperiode vor sich gehenden Bewegungen innerhalb der elektrischen Pfeife wenigstens längs der Röhrenachse aus schraubenförmigen Wirbeln bestehen.

Auch nahe den Rohrwandungen nimmt die Flamme Schraubenform an und schien es, als ob sie sich dabei etwas verschmälere; allzu nahe durfte sie aber den Rohrwandungen nicht gebracht werden, da sonst die Röhre zersprang. — Daß eine die Röhrenwand berührende Flamme Schichtungen zeigt, hat Kundt[1]) in folgender Weise nachgewiesen. Er bedeckte einen Teil der Wand einer gläsernen Orgelpfeife mit einem dünnen Blechstreifen, um die ungleichmäßige Erhitzung der Röhrenwand zu verringern, und ließ an diesem Schutzbleche eine lange Gasflamme in die Höhe steigen. Die Flamme zeigte dann Schichtungen, welche Kundt in Beziehung zu den von ihm beobachteten Staubfiguren setzte; er hielt die Flammenform für bedingt durch die Gesamtheit der Obertöne.

Bei unserem Versuche lagen die Verhältnisse anders, indem erstens die Flamme bei direkter Beobachtung gar keine Formenänderungen zeigte, die eigentümlichen Schraubenformen also einer Bewegung angehörten, die während einer Schwingungsperiode vor sich geht. Ferner kann von einer Mitwirkung der Obertöne bei unserem Versuche wohl nicht die Rede sein, da der elektrischen Pfeife unter den Versuchsbedingungen die Obertöne wahrscheinlich fehlen. Die Schraubenform der tönenden Luft ist vielleicht eine bloß scheinbare, hervorgerufen durch zahlreiche aneinander grenzende Wirbel mit meist horizontaler Achse, wie sich dieselben im Rauche bei den vorhin erwähnten Versuchen zeigen. Letztere aber erklären sich in einfacher Weise; wenn die Luftteilchen bei ihrer Schwingung zunächst eine Verschiebung in der Richtung der Rohrachse erleiden, müssen sie dank der inneren Reibung Bahnen erhalten, ähnlich denen von Flüssigkeitsteilchen, die in eine ruhende Flüssigkeit eindringen. Für den Schwingungsvorgang in tönenden Röhren wird gewöhnlich angenommen, daß er in geradlinigen, parallel der Rohrachse erfolgenden Schwingungen der Luftteilchen besteht, daß mithin keine Bewegungskomponente in den zur Rohrachse senkrechten Richtungen vorhanden ist. Diese Annahme liegt denn auch der für die Schwingung der Luft in Röhren geltenden Differentialgleichung

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} = a^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$$

zugrunde, in welcher ξ die Verrückung der Luftteilchen bedeutet, welche sich zur Zeit $t = 0$ in einer zur Rohrachse senkrechten Ebene befunden haben und die Voraussetzung gemacht ist, daß die Rohrachse mit der x-Achse zusammenfällt. Aus den erwähnten Beobachtungen scheint sich direkt zu ergeben, daß jene Gleichung bloß als eine vereinfachende Annäherung an den wirklichen Schwingungsvorgang zu gelten hat.

[1]) A. Kundt, Über die Erzeugung von Klangfiguren in Orgelpfeifen und über die Wirkung tönender Luftsäulen auf Flammen. Pogg. Ann. 128, 337 bis 355, 1866.

§ 18. Zusammenfassung der Bedingungen, unter denen die elektrische Pfeife tönt.

Bevor wir an die Frage herantreten, wie sich das Zustandekommen des Tönens der Rijkeschen Drahtnetzpfeifen und im besonderen der elektrischen Pfeife erklärt, wollen wir an dieser Stelle die verschiedenen Bedingungen zusammenfassen, welche erfüllt sein müssen, damit in solchen Pfeifen überhaupt ein Tönen erhalten werden kann.

Als erste Bedingung kann man das Vorhandensein einer bedeutenden, innerhalb gewisser Grenzen liegenden Temperaturdifferenz des Heizrostes oder Drahtnetzes und der entfernteren Teile des Klangrohrs nennen. Diese Temperaturdifferenz muß 400 bis 500° betragen; ist sie geringer, so entsteht zwar in der Röhre ein aufsteigender Konvektionsstrom, doch ist derselbe nicht imstande, tonerregend zu wirken. Aber auch eine allzu hohe Temperatur des Heizrostes ist ungünstig; bei sehr nahe aneinander liegenden Windungen des Heizrostes darf die Temperatur des letzteren nicht bis zur Weißglut gesteigert werden.

Die zweite wesentliche Bedingung ist, daß die Luft durch kleine Öffnungen oder Spalten hindurchströmen und dabei starke Streifung bzw. Verzögerung erfahren muß. Die Durchmesser solcher Öffnungen oder Spalten dürfen, wie wir sahen, nicht kleiner als 0,1 mm und nicht größer als 4 mm sein, jedoch liegen die günstigen Werte dieser Größen einander viel näher, etwa zwischen 0,3 mm und 1,5 mm. Auch die Abstände jener Öffnungen und Spalten dürfen nicht zu groß, wahrscheinlich nicht größer als 3 mm sein. Es dürfen also die Luftlamellen, welche die Drahtgitter durchdringen, nicht zu breit sein und nicht zu weit voneinander abstehen. Die Heizgitter dürfen nicht aus weichem, unelastischem Material bestehen. Sie wirken am günstigsten, wenn sie sich nahe der Mitte zwischen einem Schwingungsknoten und Schwingungsbauche befinden. Außerdem muß sich stets noch ein Schwingungsknoten oberhalb des Heizgitters befinden [1]), falls aber ein solcher fehlt, statt seiner ein abwärts blasender Luftstrom.

Die Wandungen der Klangröhren müssen starr sein. — Der Röhrenquerschnitt darf denjenigen der Heizroste oder Heizgitter nicht zu sehr übertreffen. Im letzteren Falle nämlich strömt viel Luft zwischen den Röhrenwandungen und dem Heizroste hindurch, die keine Streifung erfährt, sich nicht sehr stark erhitzt und eine sehr bedeutende Abkühlung des Heizrostes bewirkt, also nicht nur das Tönen nicht befördert, sondern ihm sogar direkt entgegenwirkt.

Endlich darf der Röhrendurchmesser nicht weniger als siebenmal in der Rohrlänge enthalten sein, es muß also $\frac{l}{d} > 7$ sein. Was diese

[1]) Für Kühltöne gilt diese Bedingung nicht, überhaupt beziehen sich auf letztere nicht alle obigen Bedingungen.

letztere Bedingung anlangt, so erklärt sie sich wohl einfach dadurch, daß bei kurzen und relativ weiten Röhren die Intensität des Konvektionsstroms nur gering ist.

Daß man den Klangröhren am besten die vertikale Stellung zu geben hat, sie jedenfalls in horizontaler Lage nicht selbständig tönen, erklärt sich einfach dadurch, daß der Konvektionsstrom im letzteren Falle nicht ungehindert bestehen kann.

§ 19. Sogenannte Reibungstöne.

Es ist im Folgenden dem Worte Reibung der allgemeinere Sinn beigelegt, den dieses Wort im gewöhnlichen Sprachgebrauche hat, wenn man von Reibung des Windes an Telephondrähten usw. spricht.

Da es zur Tonbildung in den Drahnetzpfeifen und der elektrischen Pfeife, wie wir noch soeben erwähnten, unerläßlich ist, daß die Luft an den Drähten starke Reibung erfährt, so darf man hieraus den Schluß ziehen, daß die Reibung einen wesentlichen Anteil an der Tonbildung hat. Es sei deshalb an dieser Stelle einiger Beobachtungen gedacht, die sich auf sog. Reibungstöne beziehen, und zwar auf solche, welche ihre Entstehung ausschließlich der Reibung von Gasen an festen Körpern und von Gasen an Gasen verdanken. Unter ihnen sind besonders bemerkenswert die Beobachtungen, welche Strouhal[1]) an Drähten angestellt hat, die mit konstanter Geschwindigkeit durch ruhende Luft bewegt wurden. Strouhal fand unter anderem, daß Länge und Spannung eines solchen Drahtes keinen Einfluß auf die Tonhöhe haben, daß letztere jedoch der Geschwindigkeit, mit welcher der Draht bewegt wird, nahezu direkt proportional ist. Ebenso nimmt die Intensität des Reibungstones zugleich mit jener Geschwindigkeit zu. Es ist wohl ohne weiteres klar, daß man analoge Resultate zu erwarten hat, wenn sich ruhende Drähte in einer Luftströmung befinden, wie dies in der elektrischen Pfeife der Fall ist. Auch hier also müssen Reibungstöne entstehen, deren Höhe und Stärke der Geschwindigkeit, mit welcher die Luftströmung an den Drähten vorbeistreicht, direkt proportional sind. Nun zeigen aber die Versuche, daß die Intensität dieser Töne für gewöhnlich, wenn die Drähte nicht erhitzt sind, unter der Grenze der Hörbarkeit verbleibt. Sind die Drähte erhitzt und man bläst an ihnen einen schwachen Luftstrom vorüber, so entstehen, falls sich die Drähte außerdem in einer Klangröhre befinden, recht vernehmliche Töne, doch sind es meist höhere Obertöne, nur selten der Grundton der Röhre. Ist endlich die Temperatur der Drähte so hoch, daß ihre Wärmewirkung einen kräftigen Luftzug bewirkt, so beginnt die Röhre selbständig zu tönen, falls auch die übrigen Bedingungen erfüllt sind. — Eine andere Art der Erzeugung

[1]) V. Strouhal, Über eine besondere Art der Tonerregung. Wied. Ann. 5, 216 bis 251, 1878.

von Reibungstönen besteht darin, daß man Luft durch enge Spalten oder kleine Löcher hindurchtreten läßt. Mit dieser Art der Tonerzeugung hat sich insbesondere Sondhauss[1]) eingehender beschäftigt. Er erklärt die Entstehung jener Töne durch die Annahme, daß der durch die Öffnung austretende Luftstrom einen gesonderten Körper in bezug auf die umgebende ruhende Luft bilde, welcher an den Kanten der Öffnung, aus welcher er strömt, eine Streifung oder Reibung erfährt, wodurch er in longitudinale Schwingungen gerät, wie ein mit beharzten Fingern gestrichener Holzstab. Sondhauss scheint hiernach der erste gewesen zu sein, welcher die Bildung von gesonderten Luftlamellen erkannte. Er hatte dieselben dadurch zuerst wahrgenommen, daß er aus einer Öffnung einen mit Tabaksrauch gefärbten Luftstrahl mit mäßiger Geschwindigkeit austreten ließ. Es bildete sich dann jedesmal ein scharf begrenzter, kontinuierlicher Strahl aus, der erst in einiger Entfernung von der Öffnung unruhig wurde, sich zerteilte und mit der umgebenden Luft vermischte[2]). Sondhauss meint, daß gerade der kontinuierliche Teil des Strahles der longitudinal schwingende Körper sei, welcher den Reibungston erzeugt.

Außer den Tönen, welche durch das bloße Hindurchströmen von Luft durch Spalten und Löcher entstehen, hat Sondhauss auch noch die Töne untersucht, welche beim Auftreffen von Luftströmen auf Platten und scharfe Kanten entstehen. Letztere sind in der Folgezeit wiederholt Gegenstand von Untersuchungen gewesen, insbesondere beim Studium der Ursache des Tönens von Orgelpfeifen, wobei die neueren Untersuchungen[3]) zu dem Resultate gelangt sind, daß hier nicht die Reibung, sondern eine schwingende „Transversallamelle" die Bedingung für das Tönen ist.

Daß auch ohne Mitwirkung fester Körper durch aufeinander treffende Gaslamellen Reibungstöne entstehen können, ist ebenfalls schon von verschiedenen Forschern beobachtet worden, so z. B. von Kundt[4]), welcher beobachtete, daß zwei aus engen Öffnungen austretende Luftströme und ebenso zwei mit ihren Spitzen aufeinander stoßende Gasflammen Töne hervorbringen. Eine eingehende Untersuchung der letzteren Art von Tonerzeugung stammt von Noack[5]), welcher zeigte, daß man mit zwei solchen Flammen alle hörbaren Töne

---

[1]) C. Sondhauss, Über die beim Ausströmen der Luft entstehenden Töne. Pogg. Ann. **91**, 126 bis 147 und 214 bis 240, 1854.

[2]) Derselbe, Pogg. Ann. **85**, 58, 1852.

[3]) V. Hensen, Die Triebkraft für die Tonschwingungen in den Labialpfeifen und die Lamellentöne. Drud. Ann. **2**, 719, 1900.

[4]) A. Kundt, Über einige Arten der Erzeugung von Tönen durch Flammen. Pogg. Ann. **128**, 614 bis 621, 1866.

[5]) K. Noack, Über das Tönen zusammenstoßender Flammen. Sep.-Abdr. Gießen 1883, auch Osternprogramm d. Gymn. zu Worms. 1882.

hervorbringen könne, und daß die Tonhöhe vom Abstande zwischen der Brennermündung und der Kreuzungsstelle der Flammen abhänge. Die eine von den Flammen war vertikal, die andere horizontal und es erwies sich, daß unter gewissen Verhältnissen die vertikale, unter anderen die horizontale tönend wurde

Auch bei den Sondhaussschen Kugelröhren [1]) muß man die Reibung erhitzter Luft als die erste Ursache des Tönens ansehen. Diese Röhren lassen sich besonders in dem Falle leicht zum Tönen bringen, wenn sich kurz vor der Ansatzstelle der Kugel eine starke Verjüngung befindet. Wird nun die Luft innerhalb der Kugel genügend erhitzt, so strömt sie infolge der Expansion in die Röhre, erfährt aber dabei an den Kanten des der Kugel anliegenden Röhrenendes und innerhalb jener Verjüngung starke Reibung. Sondhauss hat zu seinen Versuchen vorzugsweise Glasröhren benutzt, die sich allerdings sehr leicht herstellen lassen, dafür aber kurzdauernde Töne geben. Mit Röhren aus Messingblech gelang es mir ein recht anhaltendes Tönen zu erhalten, wenn die Kugeln zu Anfang stark und darauf mäßig erhitzt wurden, und unbegrenzt andauerndes Tönen, wenn die Röhrenwandungen durch fließendes Wasser gekühlt wurden (Zeitschr. f. phys. u. chem. Unterricht, 1907, S. 26 bis 28).

§ 20. Verschiedene Versuche eine offene Röhre zum Tönen zu bringen.

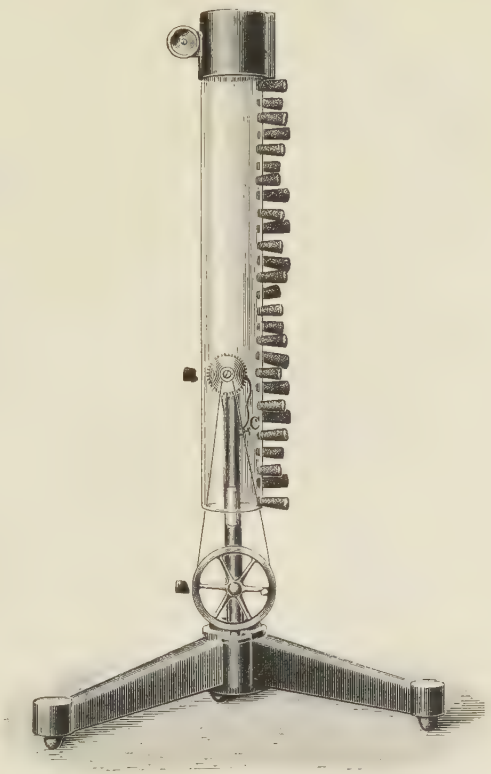
In der Absicht ein zylindrisches, an beiden Enden offenes Rohr zum Tönen zu bringen, ohne daß hierbei Wärme mitwirke, um eventuell das Tönen der Drahtnetzpfeifen und der elektrischen Pfeife auf die bloße Wirkung von periodischen Dichteänderungen oder die Wechselwirkung von Gaslamellen zurückführen zu können, wurde eine Reihe von Versuchen angestellt, auf welche im Folgenden hingewiesen sei.

Wie bekannt gerät die Luft einer Röhre in stehende Schwingungen, wenn man in der Nähe derselben einen Ton erregt, dessen Schwingungszahl dem Grundtone oder einem Obertone der Röhre entspricht. Die bekannteste Art diese Erscheinung hervorzurufen besteht darin, daß man eine tönende Stimmgabel einem der Rohrenden nähert; in ähnlicher Weise wirkt auch eine tönende Saite, Klangplatte usw. Es braucht durchaus keine genaue Übereinstimmung der Töne von Stimmgabel und Röhre stattzufinden, um die Röhre bereits recht laut tönen zu machen, nur ist die Intensität des Resonanztons um so größer, je näher man der Übereinstimmung ist.

[1]) C. Sondhauss, Über die Schallschwingung der Luft in erhitzten Glasröhren und in gedeckten Pfeifen von ungleicher Weite. Pogg. Ann. **79**, 1 bis 34, 1850. Derselbe, Über das Tönen erhitzter Röhren und die Schwingungen der Luft in Pfeifen von verschiedener Gestalt. Pogg Ann. **140**, 53 bis 56 und 219 bis 241, 1870.

Läßt man quer durch die Röhre Funkenentladungen hindurchgehen, so gesellt sich zu dem von ihnen erzeugten Geräusche der Röhrenton nur schwach hinzu. Anders aber wird es, wenn man innerhalb der Röhre die Entladungen eines Induktors mit elektrolytischem Unterbrecher hervorruft. In diesem Falle läßt sich, wie bekannt, dadurch, daß man die Größe der positiven Elektrode verändert, die Tonhöhe des Entladungsgeräusches innerhalb weiter Grenzen variieren. Nähert sich dann hierbei jene Tonhöhe derjenigen der Klangröhre, so beginnt letztere laut zu tönen. Freilich hört man hierbei noch laute Nebengeräusche, und läßt sich daher das Tönen der Röhre mit demjenigen einer Drahtnetzpfeife kaum vergleichen.

Fig. 9.



Mittels einer Savartschen Sirene läßt sich ebenfalls eine Röhre zum Tönen bringen, doch hört man auch hier deutlich ein Nebengeräusch, welches ganz zu unterdrücken mir nicht gelang. Benutzt wurde der in Fig. 9 abgebildete Apparat[1]). Er besteht aus dem Schwungrade A, das durch Schnurlauf das Zahnrädchen B in schnelle Rotation versetzt. (Zehn Umdrehungen bei einer Umdrehung von A.) Letzteres hat 36 Zähne, die gegen einen schmalen Kartonstreifen C schlagen, den man durch einen verschiebbaren Halter in wechselndem Abstande von B befestigen kann.

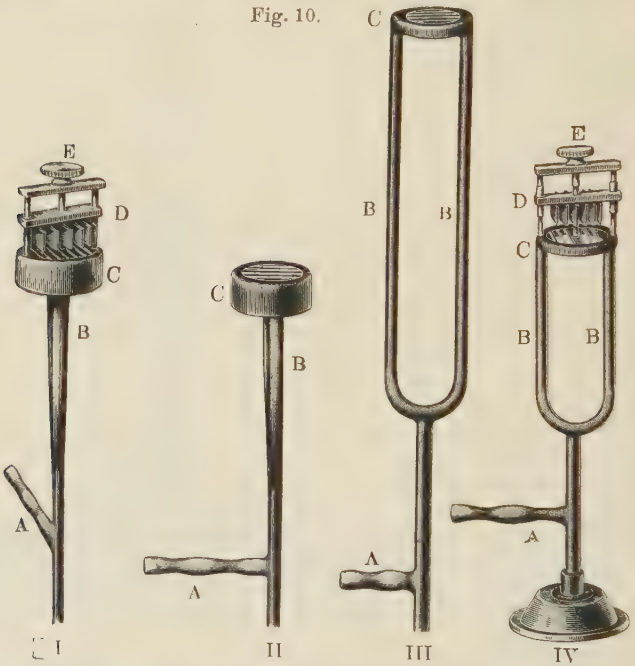
Ist das Kartonblättchen zu kurz, so läßt es Eigentöne von bedeutender Intensität erschallen. Es war daher nötig seine Länge derart zu wählen, daß die Eigentöne nicht mehr störten. Auch durfte

[1]) Die über das Zahnrädchen gestülpte Klangröhre hatte zu nicht hierher gehörigen Versuchen gedient, wie beispielsweise zu den auf S. 22 erwähnten: sie besaß 40 verschließbare Seitenöffnungen in je 1 cm Abstand.

das Blättchen nicht zu steif sein. Wenn der Ton dieser Sirene demjenigen der Klangröhre sehr nahe war und sich längere Zeit auf dieser Höhe erhielt, so tönte die Röhre laut mit, wobei es am besten war das Zahnrädchen am unteren Rohrende, etwas außerhalb der Röhre anzubringen, also dort, wo sich der Schwingungsbauch der tönenden Luftsäule befindet.

Aus allen vorhergehenden Versuchen, bei welchen die Röhre dadurch zum Tönen gebracht wurde, daß in ihr periodische Lufterschütterungen hervorgerufen wurden, läßt sich erkennen, daß diese allein jedenfalls nicht die Ursache des Tönens der Drahtnetzpfeifen sein können, da dort der Charakter des Tönens ein durchaus anderer ist.

Fig. 10.



Da man vermuten könnte, daß die zwischen den Drähten des Heizrostes der elektrischen Pfeife hindurchströmenden und oberhalb desselben in wirbelnde Bewegung geratenden Luftlamellen die Veranlassung dazu geben, daß die ganze Luftsäule der Röhre in Tonschwingungen gerät, so wurde versucht, derartige Luftlamellen ohne gleichzeitige Wärmewirkungen zu erzeugen und durch sie eine Röhre zum Tönen zu bringen. Zu diesem Zwecke wurde der in Fig. 10, III abgebildete Apparat hergestellt. Er besteht aus den Gaszuleitungsröhren *A* und *B* und dem Roste *C*, der in der Figur nicht zu erkennen und deshalb nebenan in Fig. 11 gesondert abgebildet ist. Jener

Rost besteht aus 1 mm weiten, parallelen und 1 mm voneinander abstehenden (in der Figur sind die Abstände fast doppelt so groß gezeichnet) Messingröhren, welche in eine hohle, ringförmige Fassung *R* münden und eine große Anzahl millimeterweit voneinander abstehender Öffnungen haben. Letztere sind derart gegeneinander orientiert, daß Luftströme, welche aus ihnen hervorkommen, unter rechtem Winkel gegeneinander stoßen. Bläst man diese Vorrichtung schwach an, so entsteht zwar eine ganze Reihe von recht hohen Tönen, deren Höhe von der Geschwindigkeit der Gasströmung abhängt, jedoch ist der Bereich, innerhalb dessen diese Töne liegen, nicht sehr weit und es gelang daher nicht, mit dieser Vorrichtung eine Klangröhre zum lauten Tönen zu bringen. Dasselbe gilt auch von der Vorrichtung Fig. 10, II, die aus einem etwa centimeterhohen Zylinder *C* besteht, dessen obere Grundfläche eine Reihe von sehr engen parallelen Spalten in Abständen von etwa 1 mm hat.

Fig. 11.

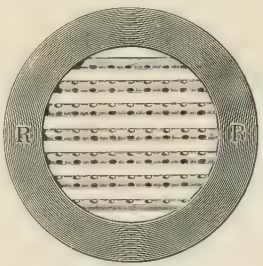


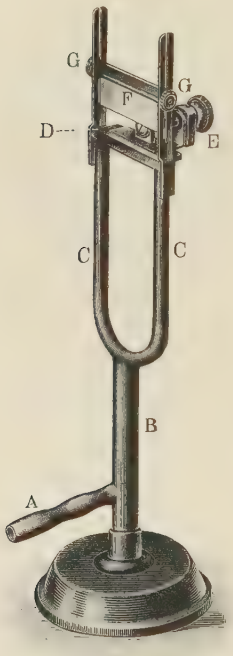
Fig. 10, IV stellt einen Apparat dar, der auch aus einem Röhrenrost besteht, doch sind hier die Röhrchen nicht mit Löchern, sondern mit je einem der Länge nach verlaufenden Spalte versehen, denen man von oben her messerartige Metallkeile nähern kann. Der Apparat gab ebenfalls nur schwache Töne, und stülpte man über denselben Klangröhren, so wurden dieselben durch ihn nicht erregt.

Fig. 10, I besteht aus einem niedrigen Zylinder *C*, in dessen oberer Grundfläche sich eine Reihe paralleler, enger Spalte befindet. Diesen lassen sich von oben her mittels der Schraube *E* Metallkeile *D* nähern. Bei geeignetem Abstande dieser Keile und entsprechendem Gasdrucke erhält man ziemlich laute Töne, die innerhalb eines weiten Gebiets liegen. Mit dieser Vorrichtung gelang es einige kürzere Röhren zum Mittönen zu bringen.

Geeigneter erwies sich ein Apparat, bei welchem sich sowohl der Keilabstand, als auch die Spaltbreite innerhalb weiterer Grenzen und ganz allmählich verändern ließen. Derselbe besteht aus einem prismatischen Hohlraum, in welchen sich Luft oder sonst ein Gas durch die Zuleitungsröhren *A*, *B* und *C* (Fig. 12) hineinleiten läßt. Mit Hilfe der Mikrometerschraube *E* läßt sich die Weite des Spaltes *D* sehr fein regulieren. Dem Spalte gegenüber befindet sich die Schneide *F*, die sich in wechselnder Höhe mittels zweier Schrauben *G* festklemmen läßt. Man hat es in der Hand die Spaltweite, den Keilabstand und den Gasdruck unabhängig voneinander zu verändern. Dabei findet man dann leicht, daß sich zwar ein und derselbe Ton bei verschiedenem Gasdruck, Keilabstand und Spaltbreite erhalten läßt, daß derselbe aber

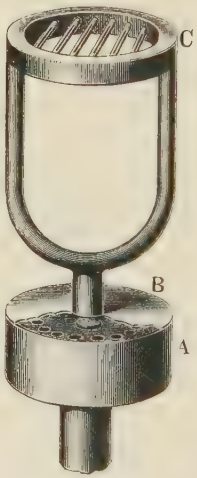
immer am lautesten für ganz bestimmte Werte dieser Größen wird. Ist nun der Ton dieser Anblasevorrichtung unison mit dem Grundtone oder einem der Obertöne einer Röhre und man überdeckt sie mit der Röhre, so wird letztere zu kräftigem Tönen gebracht, wobei es jedoch nicht gleichgültig ist, an welche Stelle innerhalb der Röhre man die Spaltkammer bringt. Besonders kräftig tönte der vierte Oberton der Röhre.

Fig. 12.



Es wurde ferner der Versuch gemacht, die Röhre dadurch zum Tönen zu bringen, daß schmale Luftbänder in dieselbe in demjenigen Tempo hineingesandt wurden, wie es der Schwingungsperiode des Grundtons entspricht. Der hierzu benutzte Apparat bestand aus einer kleinen Lochsirene, die innerhalb eines zylindrischen Gehäuses A, dessen Deckel B in unserer Fig. 13 mit einem Ausschnitt versehen ist, vollkommen eingeschlossen war und einerseits mit der Druckluftleitung, andererseits mit einem Rost C aus engen, mit je einem Spalte versehenen Röhren in Verbindung stand. Wurde diese Vorrichtung ins Innere einer Glasröhre gebracht und der die Sirene anblasende Luftstrom entsprechend reguliert, so hörte man zwar den Röhrenton erklingen, aber doch nicht in jener Fülle und Stärke, wie er von der elektrischen Pfeife erschallt; der Ton der Sirene selbst klang so schwach, daß man ihn nur aus nächster Nähe hörte.

Fig. 13.



Nach Helmholtz[1]) findet die stärkste Resonanz einer Röhre und der stärkste Schall im freien Raume statt, wenn die Bewegung der Luft am Orte einer Knotenfläche mitgeteilt wird. Um dieses zu erreichen, wurde eine kleine Lochsirene über der beweglichen Scheibe mit einem durch Schraubenführung zu verschiebenden Deckel A versehen, der so genau in die Klangröhren hineinpaßte, daß er, falls sich die Sirene innerhalb einer Röhre B befand, letztere in zwei, fast luft-

[1]) H. Helmholtz, Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden, S. 46, 1859.

dicht voneinander getrennte Teile schied. Dieser Deckel hatte den Zweck die Bildung eines Schwingungsknotens zu ermöglichen, was wegen der Luftbewegungen, die durch die Sirene hervorgerufen werden, ohne ihn an dieser Stelle nicht erreichbar wäre.

Wurde dieser Apparat in eine Glasröhre eingeführt (vgl. Fig. 14) und zwar so, daß sich jener Deckel ungefähr an der Stelle des Schwingungsknotens für den Grundton befand, so tönte die Röhre, sobald der Sirenenton dem Grundtone der Röhre nahe war. Verschloß man beide Rohrenden, so hörte man nur ganz leise den Sirenenton, verschloß man bloß das obere Ende, so erklang die zweite höhere Oktave, woraus wohl folgt, daß es sich bei dem Versuche um ein selbständiges Tönen der Röhre, nicht aber um einfache Resonanz handelte.

Fig. 14.

Bei allen im Vorhergehenden beschriebenen Apparaten kam es darauf an, zu versuchen, ob sich durch periodische Erschütterungen dieser oder jener Art, durch einfache oder in periodischer Folge erzeugte und aufeinander stoßende Luftlamellen eine genaue Nachahmung des Tönens der elektrischen und der Drahtnetzpfeifen erreichen lasse.

§ 21. Versuch einer Erklärung der Tonbildung.

Es sei nun der Versuch gemacht, eine Erklärung für die Tonbildung in der elektrischen Pfeife und den Rijkeschen Drahtnetzröhren zu geben.

Unter den verschiedenen auf den vorhergehenden Seiten beschriebenen Vorrichtungen, die dazu dienen sollten das Tönen einer beiderseits offenen Röhre zu veranlassen, erschien die in Fig. 14 skizzierte als die geeignetste, diejenigen jedoch, bei denen Luftlamellen in Wechselwirkung traten, als die am wenigsten geeigneten. Es wird daher und in Rücksicht auf das in § 18 Gesagte die Hauptursache für das Tönen der elektrischen Pfeifen, sowie der Rijkeschen Drahtnetzpfeifen wohl im Folgenden zu suchen sein.

Es steigt eine warme Luftschicht innerhalb der Klangröhre nach oben, sich hierbei abkühlend, und wird durch eine von unten nachrückende ersetzt; die hiermit verbundenen periodischen Änderungen der Luftdichte und des Luftdruckes in den aufeinander folgenden, von unten nach oben strömenden Schichten werden durch Resonanz des Heizrostes und der Luftsäule in der Röhre verstärkt. Überlagert und wahrscheinlich verstärkt werden sie auch von Wirbelbewegungen, die

wohl zum größten Teile auf die abkühlende Wirkung der Wandungen, zum Teil aber auch auf Reibung an diesen und an dem Drahtroste zurückzuführen sind.

Zum Schlusse sei es mir gestattet Herrn Prof. Dr. Adolf Heydweiller in Rostock meinen besten Dank für die Ratschläge auszusprechen, die er mir für die Veröffentlichung dieser Arbeit erteilt hat.

Das sich auf den folgenden Seiten findende Literaturverzeichnis enthält Arbeiten, die direkt oder indirekt mit dem von uns behandelten Gegenstande im Zusammenhange stehen, und jedenfalls der Mehrzahl nach irgendwie für diesen benutzt worden sind. Arbeiten selbst von namhaften Autoren dürften dort fehlen, falls sie nur nach Auszügen in Lehr- oder Handbüchern benutzt worden sind.

Benutzte Literatur.

a) Lehrbücher.

E. F. Chladni, Die Akustik. Leipzig 1830.

O. Chwolson, Lehrbuch der Physik, Bd. II. Braunschweig 1904.

A. Ganot, Traité de physique. Russ. Übers. St. Petersburg 1888.

J. S. T. Gehler, Physikalisches Wörterbuch, Bd. V. Leipzig 1829.

H. v. Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik. 5. Ausg. Braunschweig 1896.

A. Kundt, Vorlesungen über Experimentalphysik, herausg. von K. Scheel. Braunschweig 1903.

F. Melde, Akustik. Fundamentalerscheinungen und Gesetze einfach tönender Körper. Leipzig 1883.

L. Pfaundler, Lehrbuch der Physik und Meteorologie von Müller-Pouillet. Bd. I, 9. Aufl. Braunschweig 1886 und 10. Aufl. 1906.

P. Reis, Lehrbuch der Physik. Leipzig 1885.

E. Riecke, Lehrbuch der Experimentalphysik. 1. Aufl. Leipzig 1896.

H. Riemann, Katechismus der Orgel. Leipzig 1901.

F. Rosenberger, Geschichte der Physik. 3 Bde. Russ. Übers. St. Petersburg 1883—1894.

J. Strutt, Baron Rayleigh, Die Theorie des Schalles. 2 Bände. Deutsch von F. Neesen. Braunschweig 1880.

J. Tyndall, Der Schall. Übers. von H. Helmholtz und G. Wiedemann. Braunschweig 1869.

E. und W. Weber, Wellenlehre auf Experimente gegründet usw. Leipzig 1825.

B. Weinstein, Einleitung in die höhere mathematische Physik. Berlin 1901.

A. Winkelmann, Handbuch der Physik. Akustik von F. Melde. Breslau 1891 und Allgemeine Physik, Bd. I, 2. Hälfte. Leipzig 1908.

A. Wüllner, Lehrbuch der Experimentalphysik. Bd. I, 5. Aufl. Leipzig 1895 und 6. Aufl. 1907.

b) Arbeiten über die Schwingungen in Orgelpfeifen.

W. Brockmann, Beobachtungen an Orgelpfeifen. Inaug.-Diss. Berlin 1886.

H. Duhamel, Note sur la longeur des ondes. Compt. rend. **55**, 227, 1862; Remarques sur la longeur des ondes propagées dans un tube cylindrique rempli de gaz, ou dans un fil élastique. Compt rend. **55**, 253—260, 1862 [Fortschr. 28].

Ch. Fermond, Über die Entstehungsweise der Töne. Compt. rend. **17**, 800; Pogg. Ann. **62**, 576 u. ff., 1844.

W. Friedrich, Über Entstehung des Tones in Labialpfeifen. Drud. Ann. **7**, 97—115, 1902.

R. Gerhardt, Über die Rohrflöte, ein Pfeifenregister der Orgel, Wied. Ann. **28**, 281—305, 1886.

H. v. Helmholtz, Über Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen. Crelle-Borchardt. Journ. f. Math. **55**, 25—55, 1858.

H. v. Helmholtz, Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden. Crelles Journ. **57**, 1—72, 1860.

H. v. Helmholtz, Über diskontinuierliche Flüssigkeitsbewegungen. Monatsbericht d. Berl. Akad. 1868, S. 215—228.

V. Hensen, Die Triebkraft für die Tonschwingungen in den Labialpfeifen und die Lamellentöne. Drud. Ann. **2**, 719 ff., 1900.

V. Hensen, Darstellung der Lamellentöne. Drud. Ann. **4**, 41—59, 1901.

V. Hensen, Über den zur Erhaltung von Tonschwingungen notwendigen Anstoß. Ann. d. Phys. **21**, 781—814, 1906.

W. Hopkins, Über die Schwingung der Luft in zylindrischen Röhren. Trans. of the Cambridge Royal Phil. Soc., Vol. V, pt. II, p. 231; auch Pogg. Ann. **44**, 246 u. 603, 1838.

J. Kiessling, Über einige Eigenschaften des Anblasestromes bei tönenden Lippenpfeifen. Sitzber. Ges. Nat. Marburg S. 91—92 1903. Beibl. **28**, 601, 1904.

R. König, Über die Beobachtung der Luftschwingungen in Orgelpfeifen. Wied. Ann. **13**, 569—582, 1881.

W. König, Hydrodynamisch-akustische Untersuchungen. Wied. Ann. **42**, 353—370; **43**, 43—60, 1891.

W. König, Ein Apparat zur Erklärung der Kundtschen Staubfiguren. Zeitschr. f. phys. u. chem. Unters. **8**, 191—194, 1895.

W. Kohlrausch, Experimentelle Untersuchung der Töne, welche beim Durchströmen von Gasen durch Spalten entstehen. Wied. Ann. **13**, 545—569, 1881.

W. Kohlrausch, Über das Verhalten von Membranen in tönenden Luftsäulen. Wied. Ann. **8**, 584, 1879.

K. Liskovius, Zur Theorie der tönenden Luftsäulen. Pogg. Ann. **60**, 484 bis 488, 1843.

V. Mahillon, Experimentaluntersuchungen über die Resonanz von konischen, abgestumpft konischen und zylindrischen Luftsäulen. Phys. Rev. **12**, 193—219, 1901. Beibl. **25**, 658, 1901.

M. Neyreneuf, Mémoire sur les tuyaux sonores irréguliers et coniques. Ann. chim. Phys. (7) **16**, 562—574, 1899. Beibl. **23**, 949, 1899.

A. Raps, Über Luftschwingungen. Wied. Ann. **50**, 193—220, 1893.

Lord Rayleigh, On maintened vibrations. Phil. Mag. (5) **15**, 229—235, 1883.

R. H. Ridout, Production d'un son musical dans un tube continu. Mond. **52**, Nr. 11, S. 385 [Fortschr.], 1883.

R. Rubens und O. Krigar-Menzel, Flammenröhre für akustische Beobachtungen. Ann. d. Phys. (4) **17**, 860, 1905.

C. van Schaik, Über die Tonerzeugung in Labialpfeifen. Preisschr. Rotterdam 1891 [Fortschr.].

H. Schneebeli, Zur Theorie der Orgelpfeifen. Pogg. Ann. **153**, 301—305, 1874.

A. Seebeck, Über Interferenz des Schalles in Röhren. Berlin 1872.

H. Smith, On some errors of statement concerning organpipes in recent treatises on natural philosophy (Letter). Nat. **8**, 45, 1873; On the variability of the node in organpipes. Nat. **9**, 301, 1874, [Fortschr.].

C. Sondhauss, Über den Brummkreisel und das Schwingungsgesetz der kubischen Pfeifen. Pogg. Ann. **81**, 235—257, 347—873, 1850.

C. Sondhauss, Über die beim Ausströmen der Luft entstehenden Töne. Pogg. Ann. **91**, 126—147, 214—220, 1854.

F. Sonreck, Die Schwingungserregung und die Bewegung der Luftsäule in offenen und gedeckten Pfeifen. Pogg. Ann. **158**, 129—147, 1876.
N. Stücker, Über die Lage der Knotenpunkte in einseitig geschlossenen Röhren. Wien. Ber. **116**, 1231, 1907.
A. Töpler und L. Boltzmann, Über eine neue optische Methode die Schwingungen tönender Luftsäulen zu analysieren. Pogg. Ann. **141**, 321—352, 1870.
Van Tricht, Expériments de M. Lootens sur les mouvements de la colonne aérienne dans les tuyaux sonores. Journ. d. Phys. **6**, 53—57; Beibl. **1**, 229, 1877.
R. Wachsmuth, Schneidentöne und Labialpfeifen. Phys. Zeitschr. **4**, 743 bis 745; Diskussion: S. 745—748, 1903.
R. Wachsmuth, Labialpfeifen und Lamellentöne. Drud. Ann. **14**, 469—506, 1904.
M. Weerth, Über Lamellentöne. Drud. Ann. **11**, 1086—1099, 1903 (auch Inaug.-Diss. Rostock).
K. v. Wesendonk, Einige Beobachtungen über Flaschentöne. Nat. Rundsch. **20**, 389, 1905.
Zamminer, Über Schwingungsbewegung der Luft. Pogg. Ann. **97**, 173—212. 1856.

c) Arbeiten über tönende Flammen.

Dr. Bresina, Über die Schwingungen der Luft in der chemischen Harmonika. Soest 1881.
Dr. Chladni, Beobachtungen über die durch Brennen der entzündbaren Luft in einer Röhre hervorzubringenden Töne (Sep.-Abdr. aus d. N. Schriften d. Berl. Ges. d. naturf. Freunde), p. 125—130, ohne Jahreszahl.
H. V. Gill, The theory of singing flames. Amer. Journ. of science (4) **4**, 117—190, 1897. Beibl. **22**, 650, 1898.
J. Grailich und E. Weiss, Über das Singen der Flammen. Sitzber. d. Wien. Akad. **109**, 271—280, 1858.
A. Kundt, Über die Erzeugung von Klangfiguren in Orgelpfeifen und über die Wirkung tönender Luftsäulen auf Flammen. Pogg. Ann. **128**, 337 bis 355, 1866.
M. Neyreneuf, Nouvelles recherches sur l'harmonica chimique. Ann. d. chim. et phys. (6) **17**, 351—378, 1889; Ref. in Beibl. **14**, 888 (1890).
K. Noack, Über das Tönen zusammenstoßender Flammen. Sep.-Abdr. 15 S. Gießen 1883.
C. Sondhauss, Über die chemische Harmonika. Pogg. Ann. **109**, 1—43, 426 bis 462, 1860.
A. Terquem, Über die chemische Harmonika. Pogg. Ann. **134**, 468—472, 1868.
A. Töpler, Vibroskopische Beobachtungen über die Schwingungsphasen singender Flammen. Pogg. Ann. **128**, 126—139, 1866.
E. Villari, Akustische Studien über die Flammen. Pogg. Ann. **140**, 588—598, 1870.
J. Zoch, Einiges zur Kenntnis der chemischen Harmonika. Pogg. Ann. **127**, 580—593, 1866.

d) Arbeiten über Röhren, die durch Erwärmung tönen.

G. Ciamician, Über das Tönen der Luft in Röhren. Wied. Ann. **2**, 133—138, 1877.
A. Kundt, Über einige Arten der Erzeugung von Tönen durch Flammen. Pogg. Ann. **128**, 614—621, 1866.

A. G. Montenat, Sur une expérience analogue à celle des flammes chantantes. Compt. rend. **84**, 33, 1877. Beibl. **1**, 123, 1877.

Lord Rayleigh, The explanation of certain acoustical phenomena. Nat. **18**, 319—321, 1878.

P. Riess, Das Anblasen offener Röhren durch eine Flamme. Pogg. Ann. **108**, 653—656, 1859.

P. Riess, Anhaltendes Tönen einer Röhre durch eine Flamme. Pogg. Ann. **109**, 145—147, 1860.

P. Rijke, Notiz über eine neue Art, die in einer an beiden Enden offenen Röhre enthaltene Luft in Schwingungen zu versetzen. Pogg. Ann. **107**, 339—393, 1859.

C. Sondhauss, Über die Schallschwingungen der Luft in erhitzten Glasröhren und gedeckten Pfeifen von ungleicher Weite. Pogg. Ann. **79**, 1—34, 1850.

C. Sondhauss, Über das Tönen erhitzter Röhren und die Schwingungen der Luft in Pfeifen von verschiedener Gestalt. Pogg. Ann. **140**, 53—76, 219—241, 1870.

e) Reibungstöne.

V. Strouhal, Über eine besondere Art der Tonerregung. Wied. Ann. **5**, 216 bis 251, 1878.

F. Niemöller, Akustische Demonstrationsversuche. Zeitschr. f. phys.-chem. Unterr. **19**, 297, 1906.

f) Zur Theorie des Tönens.

S. Stern, Weitere Beiträge zur Theorie der Schallbildung. Pogg. Ann. **156**, 61—78 u. 211—234, 1875.

V. Hensen, Über die Umwandlung periodischer Massenanhäufungen in akustisch wirksame Bewegungen. Drud. Ann. **16**, 838—864, 1905.

V. Hensen, Das Verhalten des Resonanzapparates im menschlichen Ohr. Sitzber. d. Akad. d. Wiss. zu Berlin **38**, 904—914. Berlin 1902.

Curriculum vitae.

Hermann Pflaum, Sohn des Kammermusikers, nachmaligen Brigadekapellmeisters Ernst Pflaum, wurde am 27. (15.) Juni 1862 zu Nowaja Derewnja bei St. Petersburg geboren, besuchte vom August 1873 bis Dezember 1874 die Kronselementarschule von H. J. Fromm in Riga und von Januar 1875 bis Dezember 1882 das Rigasche Stadtgymnasium, aus dem er mit einem Reifezeugnis Nr. I entlassen wurde. Von Januar 1883 bis Dezember 1886 studierte er an der Universität Dorpat Astronomie und erhielt den Grad eines Kandidaten dieser Wissenschaft. Seine Lehrer waren in der Astronomie Prof. Dr. L. Schwarz und E. Hartwig (jetzt Direktor der Sternwarte zu Bamberg); in der Mathematik und Mechanik F. Minding, P. Helmling, A. Lindstedt (jetzt in Stockholm), O. Staude (jetzt in Rostock), Th. Molien (jetzt in Tomsk); in der Physik A. v. Oettingen (jetzt in Leipzig). Im April 1887 absolvierte er in Dorpat die modifizierte Prüfung auf das Amt eines Oberlehrers der Mathematik und Physik. Seit 1887 fungierte er in Riga an zahlreichen Privatschulen als Lehrer der Mathematik, Physik und Kosmographie. Von 1888 bis Juni 1906 war er als Oberlehrer am Rigaschen Stadtgymnasium tätig. Seit August 1906 vertritt er die Stellung eines Adjunkt-Professors der Physik und Leiters des physikalischen Kabinetts am Polytechnikum zu Riga.

Auf zahlreichen Auslandsreisen hat er die Einrichtung der physikalischen Kabinette und Institute einer Reihe von Hochschulen des Deutschen Reiches, Österreichs, Frankreichs und Italiens kennen gelernt.

Er veröffentlichte im Korrespondenzblatte des Naturforschervereins zu Riga in den Jahren 1890 bis 1906 (Bd. 34 bis 48) eine Reihe von kleinen Abhandlungen, die sich zumeist auf speziellere Fragen der Experimentalphysik bezogen, ferner einige Aufsätze in der Zeitschr. f. phys. u. chem. Unterr., der Physikal. Zeitschr. und den Ann. der Physik und ist ständiger Referent über die russische physikalische Literatur an den Beiblättern zu den Annalen der Physik seit 1899 und an den Fortschritten der Physik seit 1905.